

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Савченко Ілля Олександрович

УДК 519.876

ДИСЕРТАЦІЯ

Інструментарій освоєння підземного простору мегаполісів
на основі модифікованого методу морфологічного аналізу

01.05.04 – Системний аналіз і теорія оптимальних рішень

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І.О. Савченко

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Савченко І.О. Інструментарій освоєння підземного простору мегаполісів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.04 «Системний аналіз і теорія оптимальних рішень». – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2024.

Проблема освоєння міського підземного простору і розвитку підземного будівництва є актуальною глобально – все більше країн світу стикаються з неможливістю подальшого розвитку міст «вшир» і «вгору», і звертаються до можливостей, які надає підземний простір. Підземне будівництво забезпечує зменшення рівня шкідливих викидів, сприяє покращенню екологічної ситуації, підвищенню якості та безпеки життя людини, дозволяє захистити критичну інфраструктуру. Підземні споруди можуть виконувати подвійну функцію як укриття.

В роботі розглядається наукова проблема створення системної методології, що формує комплексне бачення підземного будівництва з урахуванням невизначеностей і багатофакторних ризиків. Метою роботи є створення інструментарію планування і прийняття рішень в процесах освоєння підземного простору мегаполісів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу (МММА). Для цього розроблено системний підхід, в рамках якого розширено, вдосконалено, масштабовано інструментарій системного аналізу, розроблено моделі для розв'язання практичних задач освоєння підземного простору великих міст. Ці моделі були застосовані для дослідження ряду практичних проблем українських міст, пов'язаних із плануванням підземного будівництва.

Оскільки задача освоєння підземного простору мегаполісів є складно формалізовною, тобто інформації щодо об'єктів дослідження притаманний ряд характеристик (неточність, неповнота, протирічність, нечіткість, недостовірність

тощо), які унеможливають їх аналіз методами традиційними дослідження операцій, природа цих недосконалостей була проаналізована, і були запропоновані прийоми, процедури, алгоритми визначення проявів впливу цих факторів для задач, що розв'язуються за допомогою МММА, а також нові способи і модифікації методу, що дозволяють зменшувати наслідки цих невизначеностей, і отримувати адекватні результати навіть в умовах недосконалих вхідних даних. На основі вдосконалення математичного апарату МММА були створені процедури оцінювання чутливості моделі, тобто визначення допустимих змін вхідних даних, що не призводять до зміни результату. Таким чином створено механізм протидії неточності вхідних даних за рахунок перевірки можливості впливу похибки на результат, і визначення найбільш критичних елементів вхідних даних, на які слід звернути особливу увагу. Розроблено прийоми використання МММА в умовах неповноти вхідних даних. Розроблено процедуру виявлення протирічності вхідних даних. Розроблено нечітку модифікацію методу морфологічного аналізу, в якій на основі використання нечітких попередніх оцінок альтернатив розраховуються нечіткі оцінки з урахуванням взаємозв'язків між параметрами. Запропоновано процедуру аналізу упередженості моделі для оцінювання можливої її недостовірності.

Задача освоєння підземного простору мегаполісів супроводжується швидкою генерацією надвеликих масивів даних і знань, обробка яких виходить за межі можливостей людини, тому були розроблені спеціальні інструменти для інтеграції МММА у процес передбачення, які використовують результати обробки великих масивів даних: розроблено інтерактивні людино-машинні процедури напівавтоматизованого видобування морфологічних таблиць із семантичних мереж для трьох типів морфологічного опису – опис об'єкту, опис стану об'єкту, опис дії або події; а також розроблено процедури оцінювання вхідних даних в МММА на основі використання результатів текстової аналітики великих корпусів неструктурованої інформації.

З метою масштабування МММА для складних системних задач, в яких взаємодіє значна кількість сутностей, було узагальнено звичайну двоетапну

процедуру методу, і на її основі розроблено методику побудови, оцінювання і використання мереж морфологічних таблиць у трьох режимах: оцінювання підготовленості – базова оцінка рішень, що адресують деяку задачу або проблему, для надання підтримки прийняття рішень щодо результативності відповідних заходів; моніторинг – використання МММА у поєднанні з розробленим автоматизованим оцінюванням на основі текстової аналітики для завчасного виявлення потенційно небажаних подій; реакція – розв’язання задачі з фіксованим параметром у випадку, коли небажана подія вже відбулась, і необхідно оперативно прийняти рішення для пом’якшення наслідків. Розроблений апарат було продемонстровано на прикладі задачі моделювання і пом’якшення наслідків соціальних лих, викликаних катастрофами і тероризмом.

Розроблено програмне забезпечення на базі SAS Studio з користувацькими модулями мовою C#, які відповідають базовим крокам МММА: конструювання морфологічних таблиць; оцінювання морфологічних таблиць; оцінювання матриць взаємозв’язків і зв’язків; розрахунок оцінок альтернатив параметрів для одноетапної та двоетапної процедур морфологічного аналізу; виведення і візуалізація результатів. Формат розробленого програмного забезпечення дозволяє компонувати модулі у різних конфігураціях для розв’язання задач різної природи і складності.

Розроблено стратегію використання різних процедур МММА в процесі сценарного аналізу, що деталізує способи і рамки застосування розроблених елементів методу в залежності від поставлених задач, характеристик вхідних даних.

В рамках створення інструментів розв’язання реальних задач освоєння підземного простору, і випробування їх на практиці, було побудовано ряд моделей з використанням розроблених вдосконалень МММА.

Була створена модель для порівняння ділянок потенційного підземного будівництва на передпроектній стадії на основі аналізу інженерно-геологічних факторів, пов’язаних із ділянкою. Модель використовує двоетапний МММА, де на першому етапі розглядаються 10 інженерно-геологічних параметрів, а на

другому визначаються оцінки 6 параметрів, що описують рішення, в тому числі доцільність чи недоцільність будівництва, доцільні масштаби і рівень забудови, ризику, пов'язані з будівництвом, і їх характеристики. Модель була випробувана на 4 реальних ділянках м. Києва. Проаналізовано перспективи будівництва на кожній із ділянок з урахуванням отриманих результатів. Проведений аналіз упередженості моделі і процедура виявлення протиріч для підвищення довіри до результатів.

Були створені моделі для оцінювання пріоритетності побудови підземних споруд конкретного призначення, зокрема, паркінгів і автомобільних тунелів із залученням мережі морфологічних таблиць, в яких присутні як інженерно-геологічні фактори із базової задачі, так і структурно-функціональні фактори, що характеризують ділянку з точки зору потреби у відповідному типі підземної споруди. Для оцінювання автомобільних тунелів була створена також гібридна модель, що поєднує елементи МММА і методу аналізу ієрархій для формування ранжувань за альтернативною процедурою. Модель оцінювання пріоритетності будівництва паркінгів використана для двох реальних ділянок м. Києва. Сформульовано висновки щодо переваги однієї з ділянок над іншою. Модель оцінювання впливів будівництва автомобільних тунелів на фактори ризику була використана для аналізу тунелів, будівництво яких передбачене Генеральним планом м. Києва. Задача розглядалась з використанням більш простої моделі для порівняння двох тунелів, і з використанням розширеної моделі, що враховує також безпекові фактори, для всіх восьми запланованих тунелів. На основі отриманих результатів обґрунтовано пріоритетність будівництва певних тунелів порівняно з іншими. Комбінована модель на основі МММА і методу аналізу ієрархій підтвердила результати, отримані з використанням МММА окремо, і також продемонструвала гнучкість використання при експертному підході до оцінювання критеріїв відповідно до пріоритетів ОПР.

Модель оцінювання структурно-функціональних факторів було адаптовано до задачі порівняння двох альтернативних ділянок потенційного будівництва Одеського метрополітену, з точки зору їх впливу на ряд факторів – вирішення

транспортних проблем, сприяння розвитку міста і туристично-рекреаційному потенціалу, забезпечення цивільного захисту, тощо. На основі цієї моделі отримані результати, що дозволяють порівняти альтернативні проєкти за їх впливом на різні сфери міського життя. Для цієї задачі також було проведено аналіз чутливості, який показав, що результати розв'язання є достатньо стійкими і слабо залежать від зміни окремих оцінок вхідних даних.

Розроблено прототип моделі на основі двоетапного МММА для порівняння урбаністичних об'єктів з точки зору їх протидії небажаним подіям. В моделі аналізуються характеристики небажаної події, і наслідки, які така подія може викликати для заданого типу урбаністичних об'єктів. Ця морфологічна модель була застосована для порівняння системи каналізаційних труб, що проходять по дну р. Дніпро, і підземного дюкера, що використовується з тією ж метою. Результати аналізу показали суттєву перевагу підземного дюкера, що дозволяє рекомендувати його в якості пріоритетного проєкту. Також ця модель була використана для порівняння мостового і тунельного переходів р. Дніпро, також підтверджуючи перевагу підземного будівництва з точки зору протидії несприятливим факторам. Для обох задач аналіз проводився як для множини несприятливих подій, так і для конкретних сценаріїв небажаних подій.

Як узагальнення розглянутих окремих задач, була запропонована мережа морфологічних таблиць оцінювання потенціалу території підземного будівництва, яка синтезує функціонально-планувальну організацію міського простору та інженерно-геологічні фактори геологічного середовища для територій, що розглядаються.

Розроблений інструментарій може бути використаний для розв'язання практичних задач, пов'язаних із освоєнням підземного простору великих міст, застосований для порівняння будь-яких інших об'єктів інфраструктури і формування основ системної стратегії розвитку міського підземного простору з метою мінімізації військових, техногенних і природних загроз.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні системної методології освоєння підземного простору мегаполісів у вигляді інструментарію

модифікованого методу морфологічного аналізу, який може використовуватись для широкого спектру задач планування підземного будівництва, включаючи аналіз доцільності будівництва з урахуванням інженерно-геологічних, структурно-функціональних, безпекових факторів, відбору критичних технологій, ранжування множини проєктів або альтернативних проєктних конфігурацій, оцінювання наслідків впливу можливих небажаних подій з урахуванням різних сценаріїв їх появи, тощо. Це дає в руки муніципалітетів, міських державних адміністрацій, інвестиційних груп і суспільних організацій, які опікуються розвитком міст, ефективний інструмент управління ризиками та інвестиціями при освоєнні підземного простору мегаполісів.

Ключові слова: системний аналіз, сценарний аналіз, прийняття рішень, метод морфологічного аналізу, невизначеність, оцінювання ризиків, міське планування, підземна урбаністика, підземний простір.

ABSTRACT

Savchenko I.O. Modified morphological analysis-based tool set for mastering underground space of metropolises. – Qualifying scientific work, manuscript.

Thesis for a doctoral degree in technical sciences on the specialty 01.05.04 "System analysis and optimal decision theory". – National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2024.

The problem of mastering the urban underground space is globally relevant, as more and more countries encounter the problem of impossible city growth sidewise and upwards, and refer to the capacities of the underground space. The underground construction provides the reduction of harmful emissions, benefits the ecological situation, improves the quality of life, and safety of the dwellers, provides the protection for the critical infrastructure. The underground facilities may perform the secondary function as shelters.

In this study, a scientific problem of creating a system methodology for the complex vision of underground construction is addressed, with the consideration of

uncertainties and multifactor risks. The goal of the research is to create a planning and decision support tool set for the processes of mastering underground space of metropolises, based on the modified morphological analysis method (MMAM). This required a system approach, within which the system analysis tool set was enhanced, improved, and scaled, and the models for solving practical tasks of mastering underground space of big cities were developed. These models were applied for studying a number of practical problems of Ukrainian cities, related to the underground construction planning.

Since the problem of mastering underground space of metropolises is difficult to formalize, meaning that the information regarding the objects of research has a number of characteristics (imprecision, incompleteness, contradictoriness, indistinctness, unreliability) that render the traditional operation research methods inefficient, the nature of these imperfections was analyzed, and several techniques, procedures, algorithms were suggested for assessing the impact of these factors in MMAM problems, as well as new upgrades and modifications for MMAM that reduce the impact of these imperfections, and allow to achieve adequate results even in case of imperfect input data. After improving the MMAM mathematical apparatus, the procedures for assessing the model sensitivity were created, that determine the admissible disturbance of input data that does not tangibly affect the result. Thus, a mechanism was created for countering imprecision in input data by checking the impact of a potential error in data on the result, and detecting the most critical input data elements that require special attention. The techniques for using MMAM under conditions of incomplete input data were developed. The procedure for detecting contradictoriness of input data was proposed. The fuzzy modification of the morphological analysis method was developed, where fuzzy preliminary estimates of alternatives are used to calculate fuzzy estimates that take into account the relations between parameters. The procedure for analyzing model bias was suggested for evaluating its potential inadequacy.

The problem of mastering underground space of metropolises is accompanied by rapid generation of extra large volumes of data and knowledge, processing which is

beyond the human capabilities, which led to the development of special techniques for integration of MMAM into the foresight process, making use of the results of processing large volumes of data: the interactive human-machine procedures of semi-automated extraction of morphological tables from semantic networks were developed for three types of morphological descriptions – the description of an object, the description of the object's state, and the description of an action or an event; also, the procedures of obtaining input data for MMAM on the base of the text analysis results of large volumes of unstructured information were developed.

To scale MMAM for complex system problems with numerous entities interacting, the ordinary two-stage method procedure was generalized, and used as a base for the technique of constructing, assessing and utilizing the networks of morphological tables in three modes: evaluating preparedness – the basic assessment of alternative decisions addressing a certain task or a problem, for decision support regarding the efficiency of different measures; monitoring – the employment of MMAM, combined with the developed automated input data extraction from text analysis, to detect potentially unfavorable events in time; reaction – the solution of the fixed parameter problem in case the unfavorable event already happened, to promptly make a decision for mitigating the consequences. The developed apparatus was illustrated on the example of the problem of modeling and mitigation of social disasters caused by catastrophes and terrorism.

Software on the base of SAS Studio with C# user modules was developed for the basic MMAM steps: constructing morphological tables, assessing morphological tables, assessing interdependency and dependency matrices, calculating parameter alternative estimated using one-stage or two-stage morphological analysis procedures, output and visualization of results. The format of the developed software allows to combine the modules in different configurations tailored to solve tasks of different nature and complexity.

A strategy for using different MMAM procedures in the scenario analysis process was developed, detailing the framework and guidelines of using the developed method elements, depending on the tasks, and the characteristics of the input data.

A number of models were constructed that make use of the MMAM improvements to create the tools for solving real problems of mastering underground space, and to test those tools in practice.

A model was created for the comparison of the potential underground construction sites at the pre-project stage on the base of geological engineering factor analysis for the site. The model employs the two-stage MMAM, with 10 geological engineering factors assessed at the first stage to determine the 6 decision parameters at the second stage, including the favorability of construction, the advisable scale and level of construction, the related risks, and their characteristics. The model was tested on 4 real sites in Kyiv. The prospects of underground construction on each of them was analyzed, considering the obtained results. To improve the credibility of results, the model bias analysis, and the contradictoriness detection procedures were conducted.

The models were created for assessing priority of construction of underground structures with specific purposes, particularly parking lots and car tunnels, using a network of morphological tables with both geological engineering factors, and structural and functional factors that characterize the site regarding the demand for the specific underground facility type. For evaluation of car tunnels, a hybrid model was also created, that combines MMAM and analytic hierarchy process for obtaining rankings according to an alternative procedure. The model for assessing parking lot construction priorities was tested for two real sites in Kyiv. The inference was made for the advantage of one site over the other. The model for assessing the impact of car tunnels on the risk factors was used to analyze the tunnels, envisioned by the Kyiv city General plan. The problem was considered first using a simpler model for comparison of two tunnels, and then using an enhanced model that took into account also safety factors, for each of the eight planned tunnels. The obtained results justified the priorities of certain tunnels, compared to the others. The combined MMAM/analytic hierarchy model confirmed the results obtained by the standalone MMAM model, and offered additional flexibility in the expert approach for weighting the criteria according to the decision maker's opinion.

The model for evaluating structural and functional factors was adapted for the problem of comparison of two alternative sections for the potential construction of the future Odesa subway, considering their impact on a number of factors – addressing the traffic problems, favoring the city development and the recreational potential, providing civil defense shelter, etc. The results obtained using this model allowed to compare the alternative projects by their impact on different processes of urban functioning. The sensitivity analysis was also conducted for this problem, showing that the calculation results are quite stable, and resilient to changes in individual values of input data.

A two-stage MMAM model prototype was developed for evaluating urban objects' resilience to unfavorable events. The model analyzes the event characteristics, and its potential consequence for a certain type of urban objects. This morphological model was applied for comparison of the sewer pipe system on the Dnipro river bed, and an underground drainage tunnel that performs the same function. The analysis results showed a substantial advantage for an underground tunnel, leading to its recommendation as a priority project. This model was also used to compare the bridge and tunnel crossings of Dnipro river, also demonstrating the advantage of underground construction regarding its resilience to unfavorable impacts. In both problems, the analysis was made for the whole multitude of unfavorable events encompassing all possible event configurations, as well as for specific scenarios of unfavorable events.

As a generalization of the considered individual problems, a network of morphological tables was proposed for evaluating the underground construction potential of a territory, synthesizing the functional planning organization of the city space, and the geological engineering factors of the geological environment at the considered territories.

The developed tool set can be applied for solving practical problems of mastering urban underground space of large cities, evaluation of any other infrastructure objects, and forming the basis of the system strategy for developing urban underground space with the purpose of minimizing military, technogenic, and natural threats.

The practical value of the obtained results lies in the creation of a system methodology for mastering underground space of metropolises in the form of a

modified morphological analysis tool set, applicable to a wide range of underground construction planning tasks, including the analysis of advisability of construction, considering geological engineering, structural and functional, safety factors; selection of critical technologies; ranking projects or alternative project configurations; assessing the consequences of potential unfavorable events, considering various scenarios of their emergence, etc. This gives the municipalities, city state administrations, investment groups, and public organizations that oversee city development, an efficient tool for risk and investment management during the process of mastering urban underground space.

Keywords: system analysis, scenario analysis, decision making, morphological analysis method, uncertainty, risk assessment, urban planning, urban underground development, underground space.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Панкратова Н. Д., Гайко Г. І., **Савченко І. О.** Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій. Київ : Наукова думка, 2020. 152 с.
2. Pankratova N., Haiko H., **Savchenko I.** Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. Cham : Springer, 2024. 256 p. (*індексується SCOPUS*)

Розділи у колективних монографіях

3. Haiko H., **Savchenko I.** System Approach to Predictive Evaluation of Underground Objects Using Modified Morphological Analysis Method. *Geominig: Systems and Decision-Oriented Perspective* / A. Shukurov, O. Vovk, A. Zaporozhets, N. Zuievskaya (eds). Cham : Springer, 2024. P. 235–249. (*індексується SCOPUS*)

Статті у наукових фахових виданнях

4. Pankratova N. D., Bidyuk P. I., Selin Y. M., **Savchenko I. O.**, Malafeeva L. Y., Makukha M. P., Savastiyarov V. V. Foresight and Forecast for Prevention, Mitigation and Recovering after Social, Technical and Environmental Disasters. *Improving Disaster Resilience and Mitigation - IT Means and Tools*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. 2014. P. 119–134. (закордонне видання, індексується **SCOPUS**)

5. **Савченко И. А.** Эволюция объекта исследования с привлечением модифицированного метода морфологического анализа. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2015. №2. С. 122–130. (фахове видання)

6. **Savchenko I.** Estimation of Morphological Tables Using Text Analysis Results. *Computer Science Journal of Moldova*. 2016. Vol. 24, No. 2(71). P. 148–156. (закордонне видання, індексується **Web of Science**)

7. **Савченко И. А.** Оценивание чувствительности решения при использовании модифицированного метода морфологического анализа. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. Т. 52, Вып. 5. С. 139–148. (фахове видання)

8. Панкратова Н. Д., **Савченко И. А.**, Гайко Г. И., Кравец В. Г. Оценивание перспектив городского подземного строительства на основе модифицированного метода морфологического анализа. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2018. Вып. 5. С. 91–102. (фахове видання)

9. Панкратова Н. Д., **Савченко И. О.**, Гайко Г. И., Кравец В. Г. Системний підхід до освоєння підземного простору мегаполісів в умовах невизначеностей та багатофакторних ризиків. *Доповіді Національної академії наук України*. 2018. №10. С. 18–25. (фахове видання)

10. Гайко Г. И., **Савченко И. О.**, Матвійчук І. О. Оцінювання ділянок будівництва підземних паркінгів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. № 15. С. 18-25. (фахове видання)

11. Pankratova N., **Savchenko I.**, Haiko H., Kravets V. System Approach to Planning Urban Underground Development. *International Journal "Information Content and Processing"*. 2019. Vol. 6, No. 1. P. 3–17. (закордонне видання)

12. Гайко Г. І., **Савченко І. О.**, Вапнічна В. В. Морфологічна модель розвитку підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору. *Науково-технічний журнал «Геоінженерія»*. 2020. Вип. 4. С. 7–18. (фахове видання категорії «Б»)

13. Pankratova N. D., Haiko H. I., **Savchenko I. O.** Morphological model for underground crossings of water objects. *System Research and Information Technologies*. 2021. No. 4. P. 53–67. (фахове видання категорії «А», індексується **SCOPUS**)

14. Панкратова Н. Д., Гайко Г. І., **Савченко І. О.** Визначення пріоритетів розвитку підземної інфраструктури мегаполісів на основі системної методології. *Науково-технічний журнал «Геоінженерія»*. 2021. Вип. 6. С. 17–27. (фахове видання категорії «Б»)

15. Haiko H., **Savchenko I.**, Haiko Y. Functional Planning Optimization of Exploiting Underground Space in Large Cities Using System Methodology. *Studies in Computational Intelligence*. 2023. Vol. 1107. P. 43–61. (закордонне видання, індексується **SCOPUS**)

**Статті у виданнях, віднесених до першого - третього квартилів (Q1-Q3)
відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal
Citation Reports**

16. **Savchenko I. O.** Estimating the Solution Sensitivity in Application of the Modified Morphological Analysis Method. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016. Vol. 52, Issue 5. P. 782–790. (закордонне видання, індексується **Web of Science, SCOPUS Q2**)

17. Pankratova N. D., Gayko G. I., Kravets V. G., **Savchenko I. A.** Problems of Megapolises Underground Space System Planning. *Journal of Automation and*

Information Sciences. 2016. Vol. 48, Issue 4. P. 32–38. (закордонне видання, індексується **SCOPUS Q3**)

18. Pankratova N., **Savchenko I.**, Gayko G., Kravets V. Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018. – Vol. 50, Issue 10. P. 34–46. (закордонне видання, індексується **SCOPUS Q3**)

19. Haiko H. I., **Savchenko I. O.**, Matviichuk I. O. Development of a morphological model for territorial development of underground city space. *Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. Vol. 3. P. 92–98. (фахове видання категорії «А», індексується **SCOPUS Q2**)

Матеріали конференцій

20. **Савченко І. О.** Декомпозиція задач з великою кількістю параметрів в модифікованому методі морфологічного аналізу // Інформатика та системні науки (ІСН-2013) : Матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф., 21–23 березня 2013 р., Полтава : ПУЕТ, 2013. С. 266–268. (заочна участь)

21. **Савченко І. О.** Стратегія формування сценаріїв на основі груп конфігурацій в модифікованому методі морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2013) : матеріали 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 27–31 травня 2013 р., Київ. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2013. С. 181. (очна участь)

22. **Савченко І. О.** Отримання вхідних даних в модифікованому методі морфологічного аналізу на основі текстової аналітики // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2014) : матеріали 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 26–30 травня 2014 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2014. С. 152. (очна участь)

23. **Savchenko I. O.** Modeling complex socio-technical systems using networks of morphological tables // System analysis and information technology : Proceedings of the 17-th International conference SAIT 2015, June 22–25, Kyiv, 2015. P. 43. (очна участь)

24. **Савченко І. О.**, Іваненко Є. В. Моделивання воєнних конфліктів за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2016) : матеріали 18-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 30 травня – 2 червня 2016 р., Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2016. С. 151. *(очна участь)*

25. **Савченко І. О.** Оцінювання чутливості двохетапної процедури модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2017) : матеріали 19-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 22–25 травня, Київ. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. С. 115. *(очна участь)*

26. **Savchenko I.** Modeling Disasters Using Networks of Morphological Tables // Conference on Mathematical Foundations of Informatics : Proceedings MFOI-2017, November 9–11, 2017, Chisinau, Moldova. P. 162–165. *(очна участь)*

27. Зайченко А. Є., **Савченко І. О.** Система підтримки прийняття рішень на основі мережі морфологічних таблиць для аналізу лісової пожежі // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали 20-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2018, 21–24 травня 2018 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2018. С. 61–62. *(очна участь)*

28. Шиби́рин А. Р., **Савченко І. О.** Система підтримки прийняття рішень на основі двохетапного модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали 20-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2018, 21–24 травня 2018 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2018. С. 98. *(очна участь)*

29. **Savchenko I. O.** Using Morphological Table Networks for Modeling Social Disaster Situations // 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 8–12 October, Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. P. 105–108. *(очна участь. Інду́ксується **Web of Science, SCOPUS**)*

30. Haiko H., **Savchenko I.**, Matviichuk I. A Morphological Analysis Method-Based Model of Assessing Territories for Underground Parking Lots // 2020 IEEE 2nd

International Conference on System Analysis and Intelligent Computing (SAIC), 5–9 October, Kyiv, 2020. – P. 173–176. (очна участь. *Індексується SCOPUS*)

31. **Savchenko I.** New Approach for Processing Cross-Consistency Matrix in Modified Morphological Analysis Method // 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing (SAIC), 5–9 October, Kyiv, 2020. P. 167–172. (очна участь. *Індексується SCOPUS*)

32. **Савченко І. О.**, Гайко Г. І. Методика оцінки екологічних і техногенних ризиків при плануванні підземного простору великих міст // Енергетика. Екологія. Людина : Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського. Київ : ІЕЕ, 2021. С. 127–134. (заочна участь)

33. **Savchenko I.** Detecting and Handling Flawed Input Data in Modified Morphological Analysis Method // 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 4–7 October, Kyiv, 2022. P. 28–31. (очна участь. *Індексується SCOPUS*)

34. Панкратова Н. Д., **Савченко І. О.** Виявлення і побудова морфологічних таблиць на основі результатів аналізу слабкоструктурованих даних // Інформаційні технології та безпека : Матеріали ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції, вип. 22. Київ : Інжиніринг, 2022. с. 59–61. (очна участь)

35. Pankratova N., **Savchenko I.** Detecting and Constructing Morphological Tables Using Weakly Structured Data Analysis Results // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3503, 2022. P. 42–51. (очна участь. *Індексується SCOPUS*)

Матеріали, що додатково відображають результати дисертації

36. Панкратова Н. Д., **Савченко І. А.** Оценивание многофакторных рисков в стратегии решения задач технологического предвидения. *Инновационное развитие социально-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования* / Под ред. Г. В. Гореловой, Н. Д. Панкратовой. Киев: Наукова думка, 2015. С. 336–344.

37. **Савченко І. А.** Методологическое и математическое обеспечение решения задач предвидения на основе модифицированного метода

морфологического анализа. *Инновационное развитие социально-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования* / Под ред. Г. В. Гореловой, Н. Д. Панкратовой. Киев: Наукова думка, 2015. С. 427–441.

38. Панкратова Н. Д., **Савченко І. О.** Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування : навчальний посібник. Київ : Наукова думка, 2015. 245 с.

39. Панкратова Н. Д., Гайко Г. И., Кравец В. Г., **Савченко И. А.** Проблемы системного планирования подземного пространства мегаполисов. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2016. Вып. 2. С.101–107.

40. Гайко Г., Назаренко І., **Савченко І.** Комбінована модель підтримки прийняття рішень щодо пріоритетів розвитку мережі автомобільних тунелів Києва. *Техніка будівництва*. 2024. Вип. 40. С. 53–64. (фахове видання категорії «Б»)

41. **Савченко І. О.** Комп'ютерна програма «Одноетапна процедура модифікованого методу морфологічного аналізу» : Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, Україна. №132163. Заявл. 21.10.2024 р. ; опубл. 18.12.2024 р.

ЗМІСТ

Вступ	25
1 Методи системного аналізу в задачах розвитку підземного простору міст..	35
1.1 Сучасні виклики розвитку мегаполісів і освоєння підземного простору як засіб їх вирішення	35
1.2 Огляд підходів і методів сценарного аналізу освоєння підземного простору	40
1.3 Стан розвитку методу морфологічного аналізу в задачах прийняття рішень і дослідження стратегій	46
1.4 Системний підхід до створення інструментарію освоєння підземного простору	50
2 Вдосконалення модифікованого методу морфологічного аналізу для роботи з неточними, неповними, недостовірними, протирічними даними.....	52
2.1 Аналіз чутливості в модифікованому методі морфологічного аналізу	53
2.1.1 Постановка задачі.....	54
2.1.2 Оцінювання чутливості для задачі з двома параметрами	55
2.1.3 Оцінювання чутливості для задачі з довільною кількістю параметрів .	59
2.1.4 Приклад оцінювання чутливості	63
2.1.5 Оцінювання чутливості альтернатив у двоетапній процедурі МММА .	64
2.1.6 Оцінювання необхідної точності вхідних даних	71
2.1.7 Аналіз впливу вхідних даних на результат	74
2.2 Процедури оцінювання повноти вхідних даних і доповнення множини альтернатив	76
2.2.1 Алгоритм доповнення вхідної оціночної інформації	77
2.2.2 Забезпечення повноти параметра за рахунок доповнюючої альтернативи	78
2.2.3 Оцінювання неповноти вхідних даних модифікованого методу морфологічного аналізу	80
2.3 Виявлення протиріч у матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів	84

2.4 Концепція модифікованого методу морфологічного аналізу для роботи з нечіткими експертними оцінками	85
2.4.1 Постановка задачі.....	85
2.4.2 Розв’язання задачі нечіткого МММА на основі показників сукупної міри приналежності вхідних даних.....	87
2.4.2.1 Визначення функцій приналежності для нормованих вхідних ймовірностей альтернатив параметрів	87
2.4.2.2 Приклад використання екстремального підходу для визначення функцій належності нормованих оцінок альтернатив при трикутних мірах належності	90
2.4.2.3 Визначення функцій приналежності для конфігурацій з використанням нормованих вхідних ймовірностей альтернатив параметрів і матриці взаємозв’язків альтернатив параметрів	99
2.4.2.4 Визначення функцій приналежності ймовірностей альтернатив на основі функцій належності конфігурацій	101
2.5 Оцінювання упередженості моделі в модифікованому методі морфологічного аналізу	102
2.6 Процедура модифікованого методу морфологічного аналізу з відносними оцінками	104
2.7 Альтернативний спосіб врахування значень матриці взаємозв’язків альтернатив параметрів	109
Висновки за розділом 2	122
3 Розширення функціоналу модифікованого методу морфологічного аналізу в рамках методології передбачення.....	125
3.1 Виявлення і побудова морфологічних таблиць з семантичної мережі	125
3.1.1 Дослідження видів морфологічних таблиць і їх елементів	126
3.1.1.1 Причини невизначеності об’єкта дослідження в МММА	126
3.1.1.2 Типи об’єктів опису морфологічної таблиці	127
3.1.1.3 Типи параметрів морфологічної таблиці.....	128
3.1.1.4 Типи параметрів морфологічної таблиці.....	129

	21
3.1.2 Видобування морфологічних таблиць із бази знань	130
3.1.2.1 Побудова морфологічної таблиці для опису стану об'єкта	130
3.1.2.2 Побудова морфологічної таблиці для опису стану об'єкта або системи	131
3.1.2.3 Побудова морфологічної таблиці для опису дії (події)	133
3.2 Оцінювання морфологічних таблиць на основі результатів текстової аналітики	138
Висновки за розділом 3	144
4 Розв'язання складних системних задач на основі використання мереж морфологічних таблиць	145
4.1 Опис складних систем у вигляді мереж морфологічних таблиць	145
4.2 Модифікований метод морфологічного аналізу для мереж морфологічних таблиць	148
Висновки за розділом 4	155
5 Розроблення програмного комплексу модифікованого методу морфологічного аналізу	157
Висновки за розділом 5	163
6 Побудова інструментарію модифікованого методу морфологічного аналізу для проблем освоєння підземного простору мегаполісів	165
6.1 Розробка стратегії використання різних процедур модифікованого методу морфологічного аналізу в процесі сценарного аналізу	165
6.1.1 Побудова морфологічних таблиць	167
6.1.2 Заповнення матриць зв'язків	169
6.1.3 Отримання вхідних даних	169
6.1.4 Розрахунок результату	170
6.2 Врахування інженерно-геологічних факторів у прийнятті рішень щодо підземного будівництва	171
6.3 Врахування структурно-функціональних факторів у прийнятті рішень щодо підземного будівництва	177
6.3.1 Модель оцінювання пріоритетності побудови підземних паркінгів ...	177

6.3.2	Модель оцінювання пріоритетності побудови автомобільних тунелів	181
6.3.2.1	Врахування безпекового фактору в моделі оцінювання пріоритетності побудови автомобільних тунелів	190
6.3.2.2	Гібридна модель на основі МММА і методу аналізу ієрархій	192
6.4	Використання модифікованого методу морфологічного аналізу для оцінки небажаних подій, пов'язаних з урбаністичними об'єктами	196
6.5	Системний підхід до структурно-функціонального планування підземного простору мегаполісів з використанням мережі морфологічних таблиць	202
	Висновки за розділом 6	212
7	Розв'язання практичних задач прийняття рішень при плануванні підземного будівництва в умовах невизначеностей та багатофакторних ризиків	214
7.1	Оцінювання придатності ділянок будівництва підземних об'єктів	214
7.1.1	Аналіз упередженості моделі	219
7.1.2	Виявлення протиріч у матриці взаємозв'язків	222
7.2	Визначення пріоритетності ділянок будівництва підземних паркінгів	223
7.3	Дослідження впливу побудови автомобільних тунелів на зменшення ризиків різного типу	225
7.3.1	Експеримент зі штучним підвищенням ймовірності пливуну в моделі	225
7.3.2	Результати тестування альтернативних ділянок потенційного будівництва тунелів	227
7.3.3	Оцінювання ділянок запланованих тунелів м. Києва з урахуванням структурно-функціональних, екологічно-безпекових факторів	236
7.3.4	Використання комбінованої моделі на основі модифікованого методу морфологічного аналізу і методу аналізу ієрархій	244
7.4	Оцінка пріоритетності розвитку альтернативних ділянок метрополітену з використанням модифікованого методу морфологічного аналізу	248
7.4.1	Адаптація морфологічної моделі	250
7.4.2	Результати розрахунків	257
7.4.3	Аналіз чутливості	265

7.5 Порівняння урбаністичних об'єктів з точки зору протидії небажаним подіям і їх наслідкам	268
7.5.1 Сценарний аналіз використання підземного простору м. Києва при військових (диверсійних) загрозах, техногенних і природних надзвичайних ситуаціях	275
7.5.2 Обґрунтування системного концепту тунельного переходу	284
Висновки за розділом 7	292
Висновки	295
Список використаних джерел	302
Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації	321
Додаток Б. Дані до порівняння тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва	328
Додаток В. Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи	331

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МММА – модифікований метод морфологічного аналізу;

МТ – морфологічна таблиця;

МВЗАП – матриця взаємозв'язків альтернатив параметрів;

МЗАП – матриця зв'язків альтернатив параметрів;

ОПР – особа, що приймає рішення.

ВСТУП

Одним із найбільш актуальних, складних для розв'язання викликів сучасного суспільства є проблема неконтрольованої урбанізації. Міста стають центрами тяжіння соціально активного населення, пропонуючи унікальні можливості з самовдосконалення, розвитку, ведення бізнесу, отримання послуг тощо, призводячи до невідворотного росту мегаполісів і агломерацій по всьому світу. Водночас потенціал розширення і збільшення щільності міст є зазвичай обмеженим, тому тенденція подальшої технологізації, експансивного розвитку веде до критичного підвищення рівня так званих «хвороб урбанізації» – стресу, шуму, забруднення, які негативно впливають на рівень якості життя людей, і можливості сталого розвитку.

Перехід до Індустрії 5.0 ґрунтується на таких принципах, як людиноцентричність, збереження навколишнього середовища та соціальна користь, розвиток технологій з урахуванням їхнього впливу на соціальну, екологічну та економічну сфери. Для мегаполісів таким рішенням має стати системне освоєння підземного простору, із передачею найбільш небезпечних та ризикованих функцій поверхневих об'єктів і комунікацій підземним спорудам, забезпечуючи зменшення екологічних і техногенних ризиків. Розумне використання підземного простору, гармонізація наземної і підземної забудови може стати рушієм трансформації міст до людиноцентричних, кліматично нейтральних осередків людської активності. Освоєння підземного простору також є надзвичайно актуальною проблемою саме для українських міст, які потерпають від повітряних атак внаслідок військової агресії РФ, оскільки підземні об'єкти можуть виконувати подвійну функцію як укриття, забезпечувати додатковий захист критичної інфраструктури.

Аналіз досліджень і публікацій, присвячених підземному будівництву свідчить про те, що ця задача є актуальною глобально – все більше країн світу стикаються з проблемою неможливості подальшого розвитку міст «вшир» і «вгору», і звертаються до можливостей, які надає підземний простір. Існують

концепції розвитку підземних доповнень міст, і на даний час вже присутня велика кількість вдалих реалізованих проєктів, а також ще більша кількість запланованих проєктів підземного будівництва. Втім, дійсно вдалі рішення враховують особливості конкретного міста, інженерно-геологічні характеристики території, структурно-функціональні, екологічні, економічні, соціальні аспекти функціонування міста, і тому їх практично неможливо, або недоцільно, відтворювати в інших містах через кардинальну відмінність умов і обставин. Існуючі концепції розвитку наземної частини міст не застосовні до підземного простору через абсолютно іншу його природу. В той же час хаотична підземна забудова без наявності системного бачення, яка, на жаль, іноді спостерігається в реальності, призводить до нераціонального використання ресурсів, виникнення конфліктів між підземними об'єктами, і недосконалих рішень задач будівництва, які не досягають поставленої мети.

Відповідно, була сформульована наукова проблема створення системної методології, що формує комплексне бачення підземного будівництва з урахуванням невизначеностей і багатофакторних ризиків, яка визначила тему і напрямки дисертаційних досліджень.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до тематики науково-дослідних робіт НН ІПСА Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Базовими науково-дослідними роботами для підготовки і подання даної дисертаційної роботи були держбюджетні прикладні дослідження за конкурсами МОНУ:

- 2523-п “Розробка інформаційної системи супроводження процесу передбачення” (№д/р 0112U003164, 2012–2013 рр.);
- 2727-п “Розробка інформаційно-експертної системи передбачення з урахуванням поглибленої аналітики неструктурованих даних” (№д/р 0114U001533, 2014–2015 рр.);
- 2914-п “Побудова інформаційно-аналітичної системи передбачення соціальних лих, викликаних катастрофами і тероризмом” (№д/р 0116U003772, 2016–2017 рр.);

- 2008-п “Розвиток підземної урбаністики як системи освоєння георесурсів великих міст” (№д/р 0117U002414, 2017–2019 рр.);
- 2118-п “Побудова інформаційно-аналітичної платформи сценарного аналізу на основі великих обсягів слабкоструктурованої інформації” (№д/р 0118U003779, 2018–2020 рр.);
- 2706-п “Моделювання ризиків та захист від критичних впливів споруд міської підземної інфраструктури та цивільного захисту” (№д/р 0124U000912, 2024–2026 рр.).

Держбюджетні фундаментальні та прикладні дослідження за планом НАНУ:

- 2263-ф “Розробка теоретичних засад прийняття рішень на основі методології передбачення” (№д/р 0112U000558, 2012–2016 рр.)
- 2287-ф “Розроблення теоретичних засад сценарного аналізу на основі великих обсягів слабкоструктурованої інформації” (№д/р 0117U002150, 2017–2021 рр.)
- 2305-ф “Розробка моделей та методів розв’язання задач передбачення на основі великих обсягів слабкоструктурованої інформації в умовах невизначеності” (№д/р 0122U000671, 2022–2024 рр.)
- 23.2021.ММ, 23.2022.ММ “Інструментарій моделювання і сценарного аналізу планування розвитку інфраструктури мегаполісу в умовах екологічних, техногенних і терористичних загроз” (№д/р 0121U110526, 2021–2022 рр.)

Також дослідження проводились в рамках:

- проєкту за грантом НАТО Science for Peace and Security G4877 “Modeling and Mitigation of Social Disasters Caused by Catastrophes and Terrorism” (2015–2017 рр.);
- конкурсу українсько-молдовських проєктів, теми М/5-2017, М/42-2018 “Розробка інструментарію моделювання стратегії пом’якшення соціальних лих, викликаних катастрофами і тероризмом” (№ д/р 0117U003130, 0118U005004, 2017–2018 рр.);

- проекту НФДУ № 109/01.2020, № 114/01/0247 “Інструментарій планування підземної інфраструктури великих міст для забезпечення мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору на основі системної методології” (№д/р 0120U104941, 0121U111131, 2020–2021 рр.);
- проект «Ukraine towards Carbon Neutrality (U_CAN)» за грантовою програмою Horizon Europe Framework Programme, Grant Agreement: 101148374.

Метою дисертаційної роботи є розроблення інструментарію планування і прийняття рішень в процесах освоєння підземного простору мегаполісів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу.

Для досягнення мети дослідження поставлені і розв’язані такі завдання:

- дослідження методів системного аналізу в задачах розвитку підземного простору міст;
- розроблення прийомів, алгоритмів, процедур модифікованого методу морфологічного аналізу для роботи з неточними, неповними, нечіткими, недостовірними, протирічними даними;
- інтеграція МММА в процес сценарного аналізу для вдосконалення способів отримання вхідних даних;
- масштабування методу для використання в комплексних задачах, що містять велику кількість взаємопов’язаних об’єктів і сутностей;
- створення програмного комплексу, що реалізує вдосконалений МММА;
- розроблення інтегрованого підходу використання МММА для підтримки структурно-функціонального планування підземного простору мегаполісів;
- розв’язання ряду практичних задач планування підземного простору українських міст в умовах невизначеностей та багатofакторних ризиків.

Об’єктом дослідження є процеси освоєння підземного простору мегаполісів.

Предметом дослідження є системна методологія, що включає підходи, методи, моделі на основі модифікованого методу морфологічного аналізу (МММА) для прийняття рішень в умовах невизначеності, недосконалої вхідної інформації, багатофакторних ризиків.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні методології системного аналізу, методології сценарного аналізу, модифікованого методу морфологічного аналізу, теорії ймовірностей, методології аналізу багатофакторних ризиків, апарату нечітких множин, методологій представлення знань і текстової аналітики.

Наукова новизна роботи визначається такими теоретичними і практичними результатами, отриманими автором:

1. Розроблено системний підхід до застосування модифікованого методу морфологічного аналізу в проблемах освоєння підземного простору мегаполісів, що відрізняється розглядом запланованих об'єктів у комплексі наземної та підземної урбаністичних систем, врахуванням невизначеностей та багатофакторних ризиків.

2. Вперше запропоновано алгоритмізовані підходи, методи, прийоми роботи з різними типами невизначеностей вхідної інформації у методі морфологічного аналізу, що враховують характер цієї невизначеності, а саме: неточність, неповнота, нечіткість, протирічність, недостовірність вхідної інформації.

3. Вперше запропоновано шляхи узгодження МММА з етапом збору даних у процесі передбачення, у вигляді прийомів отримання морфологічних таблиць на основі семантичних мереж, і оцінювання вхідних даних у МММА на основі результатів текстової аналітики, що відрізняються більшим ступенем автоматизації і зменшенням суб'єктивності отриманої інформації.

4. Розроблено методологічний і математичний апарат побудови і оброблення мереж морфологічних таблиць для складних системних задач, що відрізняється можливістю включати в процес морфологічного дослідження множину об'єктів, що взаємодіють між собою, і надавати підтримку прийняття рішень щодо всієї системи.

5. Вперше побудовано ряд моделей на основі МММА для підтримки прийняття рішень щодо практичних задач підземної урбаністики, що враховують взаємодію з іншими урбаністичними об'єктами і системами, невизначеності та багатофакторні ризики:

- модель для оцінювання ділянок будівництва підземних об'єктів;
- модель для оцінювання пріоритетності побудови підземних об'єктів конкретного типу (паркінги, тунелі) з урахуванням інженерно-геологічних, структурно-функціональних, безпекових факторів;
- модель для оцінювання пріоритетності розвитку альтернативних ділянок метрополітену;
- модель для оцінювання небажаних подій для урбаністичних об'єктів.

На основі створених моделей розв'язано ряд практичних задач для українських міст.

6. Розроблено узагальнену модель на основі мережі морфологічних таблиць для підтримки структурно-функціонального планування підземного простору і оцінювання потенціалу території підземного будівництва, що характеризується синтезом функціонально-планувальної організації міського простору та інженерно-геологічних факторів геологічного середовища для територій, що розглядаються.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні системної методології освоєння підземного простору мегаполісів у вигляді інструментарію модифікованого методу морфологічного аналізу, який може використовуватись для широкого спектру задач планування підземного будівництва, включаючи аналіз доцільності будівництва з урахуванням інженерно-геологічних, структурно-функціональних, безпекових факторів, відбору критичних технологій, пріоритезацію множини проєктів або альтернативних проєктних конфігурацій, оцінювання наслідків впливу можливих небажаних подій з урахуванням різних сценаріїв їх появи, тощо. Це дає в руки муніципалітетів, міських державних адміністрацій, інвестиційних груп і суспільних організацій, які опікуються розвитком міст, ефективний інструмент управління ризиками та інвестиціями при

освоєнні підземного простору мегаполісів. За результатами досліджень оформлені «Рекомендації з мінімізації екологічних і техногенних ризиків при плануванні урбаністичного простору м. Києва», затверджені рішенням вченої ради Навчально-наукового Інституту прикладного системного аналізу 22.11.2021 р., і передані зацікавленим організаціям. Результати досліджень також використовуються в навчальному процесі кафедри математичних методів системного аналізу НН ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема при викладанні дисциплін «Системний аналіз», «Моделювання складних систем».

Матеріали дисертації доповідались на всеукраїнських і міжнародних конференціях, зокрема на міжнародній конференції “Системний аналіз та інформаційні технології” (м. Київ, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018); на всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформатика та системні науки» (м. Полтава, 2013); на Міжнародній конференції «Mathematical Foundations of Informatics» (м. Кишинев, Молдова, 2017); на Міжнародній конференції під егідою IEEE «System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)» (м. Київ, 2018, 2020, 2022); на науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2021); на міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики» (м. Київ, 2021).

Основні результати дисертації викладені у 35 публікаціях, з них 2 монографії [73, 151] (в т.ч. одна англійською мовою, проіндексована в наукометричній б.д. Scopus [73]); 1 розділ у колективній монографії, проіндексований в наукометричній б.д. Scopus [34]; 16 статей у фахових виданнях, включаючи 8 статей у виданнях, що індексуються в наукометричних б.д. Scopus та/або WoS [35, 36, 69, 70, 74, 82, 101, 102] (в т.ч. 2 статті у виданнях Q2 [36, 101] і 2 статті у виданнях Q3 [70, 82]), 7 статей у періодичних фахових виданнях України, віднесених до категорії «Б» або з переліку МОНУ наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії (до 2019 року) [135, 136, 150, 160, 161, 168, 171], 1 стаття у періодичному фаховому закордонному виданні [83]; 16 опублікованих доповідей

на всеукраїнських і міжнародних конференціях [37, 81, 100, 103–106, 142, 156, 163, 167, 169, 170, 172, 173, 176] (в т.ч. 5 у виданнях, що індексуються в наукометричних б.д. Scopus та/або WoS [37, 81, 100, 105, 106]).

В дослідженнях використовується методологія системного аналізу, запропонована у роботах доктора технічних наук, професора Н.Д. Панкратової. Значну роль у постановці задач, наданні експертної інформації, інтерпретації результатів відіграв доктор технічних наук, професор Г.І. Гайко. У працях, написаних у співавторстві, до особистого внеску здобувача належать: розділи 3 і 4, присвячені викладенню методології модифікованого морфологічного аналізу, і стратегії його використання в задачах підземної урбаністики [151]; розділи 3 і 4, в яких детально описується модифікований метод морфологічного аналізу для задач освоєння підземного простору, і моделі, побудовані на його основі [73]; розробка морфологічної моделі порівняння підземних ділянок [34]; стратегія використання МММА в задачах прогнозування і пом'якшення наслідків соціальних, технічних і природних катастроф [69]; концепція використання МММА для оцінювання невизначеностей і ризиків підземного будівництва [70]; концепція використання МММА для оцінювання перспектив підземного будівництва [82]; способи експертного оцінювання для формування морфологічних моделей в задачах підземної урбаністики [160]; побудова морфологічної моделі інженерно-геологічних факторів ділянки будівництва [161]; використання моделі на основі МММА із залученням розробленого програмного забезпечення для порівняння двох ділянок [36]; опис ролі і місця МММА в системному підході до підземного будівництва [83]; побудова мережі морфологічних таблиць для оцінювання паркінгів [136]; стратегія оцінювання ризиків у морфологічних моделях для підземного будівництва [135]; розроблення морфологічної моделі впливу небажаних подій для урбаністичних об'єктів [74]; побудова морфологічної моделі оцінювання пріоритетності альтернативних проектних конфігурацій підземних об'єктів [150]; створення мережі морфологічних таблиць для функціонально-планувальної оптимізації підземного простору мегаполісів [35].

В дисертаційній роботі І. Матвійчука «Планування підземного простору мегаполісів у змінному геологічному середовищі» [145] для ілюстрації його підходу використані результати, отримані при розв'язанні двох задач, моделі яких наведені у даному дисертаційному дослідженні.

Дисертаційна робота складається зі вступу, переліку умовних позначень, семи основних розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 332 сторінках і містить 320 сторінок основної частини, 67 рисунків, 89 таблиць, і список використаних джерел із 176 найменувань. Додатки містять список публікацій здобувача за темою дисертації, таблиці допоміжних цифрових даних, акти впровадження результатів роботи.

У першому розділі виконано аналіз публікацій за тематикою дослідження, розглянуто концепції освоєння підземного простору мегаполісів, сучасні підходи і засоби розв'язання цієї задачі, актуальні модифікації методів системного аналізу, які можуть бути використані для інструментарію освоєння підземного простору мегаполісів; обґрунтовано системний підхід до створення такого інструментарію.

Другий розділ присвячено підходам, прийомам, процедурам, алгоритмам МММА для роботи зі вхідними даними, що характеризуються неточністю, неповнотою, протирічністю, нечіткістю, недостовірністю; наведено процедуру оцінювання чутливості в МММА, способи оцінювання повноти вхідних даних і доповнення множини альтернатив параметрів; алгоритм виявлення протиріч у МВЗАП; нечітку модифікацію МММА; прийом оцінювання упередженості моделі; альтернативні способи врахування МВЗАП.

В третьому розділі розглядається інтеграція МММА із методологією сценарного аналізу шляхом отримання вхідних даних на основі етапу попереднього вивчення проблеми в процесі передбачення. Наведено шляхи напівавтоматизованого видобування морфологічних таблиць із семантичних мереж; способи оцінювання альтернатив і значень МВЗАП на основі використання результатів текстової аналітики.

В четвертому розділі наводиться узагальнення двоетапної процедури МММА на випадок довільної кількості взаємодіючих між собою сутностей, що

описуються морфологічними таблицями – апарат мереж морфологічних таблиць. Розглядаються способи використання мереж морфологічних таблиць, в тому числі на прикладі мережі морфологічних таблиць для запобігання і пом'якшення наслідків соціальних лих, викликаних катастрофами та тероризмом.

П'ятий розділ присвячено розробленій програмній реалізації модифікованого методу морфологічного аналізу і особливостям роботи з нею.

В шостому розділі наводиться методика використання розробленого інструментарію МММА, і моделі на його основі для різних задач освоєння підземного простору, включаючи модель для оцінювання ділянок підземного будівництва з урахуванням інженерно-геологічних факторів; моделі для пріоритезації проєктів підземного будівництва споруд конкретного класу (паркінгів, автомобільних тунелів); моделі порівняння урбаністичних об'єктів з точки зору їх протидії небажаним подіям і їх наслідкам; узагальнена модель функціонально-планувальної оптимізації підземного простору мегаполісів на основі мережі морфологічних таблиць.

В сьомому розділі продемонстрована робота розробленого інструментарію і моделей для розв'язання ряду практичних задач, пов'язаних із оцінюванням ділянок перспективного підземного будівництва у м. Києві, визначенням пріоритетності будівництва автомобільних тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва, порівнянням альтернативних проєктних конфігурацій Одеського метрополітену, обґрунтуванням переваг використання підземного дюкера замість комплексу каналізаційних труб, що проходять по дну р. Дніпро.

Автор висловлює щиру подяку д.т.н., проф., чл.-кор. НАНУ Панкратовій Н.Д. за наукове консультування при проведенні досліджень і виконанні роботи, і д.т.н., проф. Г.І. Гайку за консультування і надання експертної інформації в галузі підземного будівництва.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ В ЗАДАЧАХ РОЗВИТКУ ПІДЗЕМНОГО ПРОСТОРУ МІСТ

1.1 Сучасні виклики розвитку мегаполісів і освоєння підземного простору як засіб їх вирішення

Сталі історичні закономірності ведуть до постійного зростання міст у всіх країнах світу. Відділ з економічних і соціальних питань ООН оцінює кількість мешканців міст на планеті у 4,22 млрд. осіб у 2018 р., і прогнозує зростання цієї цифри до 6,68 млрд. у 2050 році [122] – суттєво більше, ніж половина всього населення Землі. І хоча міста є потужним двигуном економіки, виробляючи 80% світового ВВП [33], і в цілому позитивно впливають на економічне зростання, зменшення бідності і людський розвиток, пов'язані з інтенсивною урбанізацією проблеми викликають все більше занепокоєння.

Більшість існуючих міст були засновані достатньо давно, і їх функціонально-планувальна організація не передбачала сучасної кількості мешканців. У зв'язку з цим виникає ряд проблем, які потребують уваги:

– транспортні проблеми. Через недосконалу функціонально-планувальну організацію транспортної мережі знижується швидкість транспортного потоку і виникають дорожні затори. За оцінками, США щорічно втрачає від дорожніх заторів близько 300 млрд. доларів [87]. Щорічні втрати тільки для Нью-Йорка складають 33,7 млрд. доларів, в середньому за рік водій в цьому місті проводить 91 годину в дорожньому заторі [13]. Також у містах відбувається суттєва кількість дорожньо-транспортних пригод, в тому числі із смертельними наслідками – наприклад, в 2020 р. в містах ЄС зафіксовано в середньому 16,7 смертей на 1 млн. населення країни саме через дорожні аварії [21];

– екологічні проблеми. Мегаполіси як осередки діяльності людини, суттєво впливають на навколишнє середовище через такі фактори, як забруднення повітря, вплив на екосистеми, використання земельних ресурсів, біогеохімічні

цикли і забруднення води, управління відходами, і клімат [5]. Вплив зростання міст на навколишнє середовище, і проблеми, пов'язані з ним, поступово змінювались від санітарних проблем XIX століття, до проблем забруднення і накопичення відходів у XX столітті, і до проблем стійкості (sustainability) у XXI столітті. Масштаб цих проблем змінювався як у просторі (від загроз в та біля будинку, до загроз всій території міста, до глобальних проблем стійкого розвитку), так і у часі (від безпосередніх загроз здоров'ю, до довготривалого погіршення систем природного життєзабезпечення) [62]. Через викиди в атмосферу, що призводять до ефекту «міського острова спеки», температура в містах зростає вдвічі швидше, ніж в середньому на планеті [8]. Згідно з [24], на даний момент близько 350 міст потерпають від екстремальної спеки (середня тримісячна температура становить щонайменше 35°C), і при поточній траєкторії зростання викидів у 2050 р. таких міст стане близько 970. В [59, 107] показано, що компактні, густозаселені міста більш енергетично ефективні, але піддають жителів більшим концентраціям шкідливих речовин, в той час як великі міста з обширною територією вносять непропорційно більший внесок у глобальне забруднення повітря і збільшення парникового ефекту;

– соціально-економічні проблеми. Нерівномірності розвитку районів міста, відсутність чітких планів розбудови міст призводять до ряду специфічних урбаністичних проблем. Подолання соціально-економічної нерівності є важливою умовою сталого розвитку міст [25]. Невдале планування, нерівномірність робочих місць, відсутність якісної системи громадського транспорту призводять до появи нетрів, і хоча в цілому ця проблема має тенденцію до зменшення [122], її актуальність залишається. На демографічний розподіл мешканців міста може впливати явище джентрифікації – реконструкція й оновлення будівель у раніше непривабливих частинах міста та асоційований з ними переїзд до району багатших мешканців, і хоча саме по собі це явище не обов'язково є негативним, воно ускладнює процеси прогнозування і, відповідно, планування структурно-функціонального розвитку міста [23, 175]. Для великих міст через їх розмір і складність особливо гостро постає проблема забезпечення електроенергією,

теплом, водою, проблема відведення води і вивезення відходів. Від ефективності управління цими процесами суттєво залежать якість життя і добробут мешканців [49]. Окремою складною для вирішення проблемою великих міст є шумове забруднення [29], яке окрім дискомфорту збільшує ризики серйозних захворювань, зокрема серцево-судинних [40, 64];

– територіальні проблеми. Надмірне зростання міст призвело до того, що термін «велике місто» недостатньо точно характеризує урбаністичні об'єкти, які вони з себе представляють. Вводяться такі поняття як мегаполіс, мегамісто [123] – міська агломерація з 10 млн. або більше мешканців [122], мегалополіс – густозаселена урбанізована територія, що складається з декількох міських агломерацій. Зокрема, населення Токійської агломерації з іншими безпосередньо пов'язаними містами (пояс Тайхейо) складає 81 млн. мешканців станом на 2015 рік [114]. Виникнення таких утворень пов'язано із явищем розростання міст (urban sprawl) – недостатньо регульованою появою житлової забудови, офісних і торгівельно-розважальних центрів поруч із територією міста. Це явище негативно впливає на навколишнє середовище, знищуючи незабудоване довкілля, підсилює соціально-економічні проблеми та підриває життєздатність міської території [99].

Отже екстенсивна модель розвитку міст вичерпала себе, оскільки подальше розширення міст «вшир» і «вгору» призводить до підсилення і взаємної інтенсифікації існуючих проблем. Вирішення зазначених негативних сторін урбанізації є одним із ключових викликів, що стоять перед суспільством. Зокрема, сталий розвиток міст є однією з цілей сталого розвитку, ухвалених на Саміті ООН зі сталого розвитку [121]. Під сталим розвитком міста розуміють його сталий екологічний, економічний і соціальний розвиток [125].

Одним із засобів вирішення або пом'якшення урбаністичних проблем є розвиток підземного містобудування і раціональне освоєння підземного простору [111, 115]. Підземна урбаністика сприяє сталому розвитку через оптимізацію використання земельних ресурсів, диверсифікацію міських функцій, спрощення і забезпечення комунальної інфраструктури, збагачення соціального життя. Підземний простір як цінний земельний ресурс має бути інтегрованим в загальний

план управління міськими ресурсами і стратегію розвитку, за рахунок раціонального співвіднесення наявних ресурсів із економічними потребами і координації міських адміністрацій, приватних забудовників і жителів міста [44].

Підземні транспортні комунікації здійснюють значний позитивний вплив на довгостроковий сталий розвиток міських територій. Добре спланована підземна транспортна система зменшує необхідність до розростання міст і може позитивно впливати на використання земельних ресурсів і прийняття будівельних рішень. Безпечні і ефективні підземні перевезення зменшують загальну тривалість руху і збільшують швидкість, що в свою чергу, призводить до зменшення використання палива, і викидів шкідливих речовин. Переміщення ключових автомагістралей під землю може забезпечити краще розділення транспортних потоків – зокрема, за рахунок використання різних рівнів, таким чином зменшуючи навантаження на поверхневі дороги. Підземні транспортні комунікації можуть вирішити проблему складних наземних транспортних розв'язок, що займають суттєву частину міського простору і перешкоджають руху пішоходів. Навіть часткове перенесення автомобільного руху під землю зменшує шумове навантаження, відкриває нові можливості використання земельних ресурсів і збільшує цінність земельних ділянок [67].

Значну роль у сталому розвитку міста відіграє також і підземний громадський транспорт, в першу чергу метрополітен, який значною мірою підвищує зв'язаність, доступність і поліцентричність міста, сприяє подоланню соціальних нерівностей, що було показано на прикладах різних міст світу [4, 109]. Транзитно-орієнтоване проектування може стати основою планування міста, де в підземній транспортній мережі центрами транзитно-орієнтованого проекту стають станції метрополітену і підземні вокзали, оточені відносно щільною підземною забудовою, що включає ТРЦ, паркінги, багатофункціональні комплекси тощо [127, 132]. Свіжі дослідження 1500 міст по всьому світу з населенням, більшим за 500 000 осіб показують, що наявність метрополітену в місті в середньому зменшує питомі викиди CO₂ вдвічі [12, 50], що суттєво впливає на глобальний викид парникових газів.

За рахунок використання підземного простору місто може стати більш безпечним і комфортним для пішоходів [10], розділяючи транспортний і людський потоки, надаючи можливість швидкого переміщення пішоходів у випадку, якщо наземний шлях вимагає суттєвого обходу, в тому числі підземні пішохідні комунікації можуть використовувати засоби для підвищення мобільності – ескалатори, траволатори, встановлення яких на поверхні може бути недоцільним. Підземний простір для пішоходів може виконувати і подвійну функцію як укриття від природних катастроф або повітряних атак. Мультифункціональні підземні комплекси з торгівельно-розважальними центрами утворюють нову «тканину» міста зі своїми особливостями [1].

Ще однією з можливостей, які відкриває освоєння підземного простору, є захист міської критичної інфраструктури від багатьох ризиків [7]. Підземні споруди менш вразливі до природних і техногенних катастроф, краще захищені від терористичних актів і ударів з повітря у разі військових дій. Підземний простір може відігравати значну роль у забезпеченні міста електроенергією за рахунок використання геотермальних джерел [26]. Розміщення в підземному просторі міських виробничих підприємств – електростанцій, заводів, фабрик також вирішує ряд проблем, зменшуючи рівень викидів і шуму на поверхні, вивільняючи простір під більш привабливі урбаністичні об'єкти – парки, зелені зони, місця відпочинку тощо. Перенесення у підземний простір об'єктів, що характеризуються викидами в атмосферу – як промислових, так і транспортних – здатне зробити суттєвий внесок у досягнення вуглецевої нейтральності міст [119].

Отже, освоєння підземного простору є ключовим чинником розв'язання ряду складних проблем міста. Вплив на розвиток великих міст здійснюється за допомогою ряду управлінських інструментів – таких, як стратегії соціально-економічного розвитку у формі генеральних планів і планів капітального будівництва, схем транспорту, програм пріоритетних заходів. Втілення цих стратегій можливе при скоординованій діяльності державних органів, приватних компаній, громадських організацій з урахуванням інтересів суспільства.

Однак при цьому слід розуміти, що розвиток підземної інфраструктури є міждисциплінарною проблемою. Сталий розвиток міста можливий тільки у випадку гармонійної взаємодії різних інституцій – державних і муніципальних адміністрацій, громадських організацій, будівельників, інвесторів тощо. На даний час підземні інфраструктурні проєкти часто виконуються локально, без урахування суспільних потреб і довгострокових наслідків. Особи, що залучені в процеси прийняття рішень, часто діють незалежно, і іноді з конфліктуєчими політичними, соціальними і економічними інтересами. Тому для системного, цілеспрямованого освоєння підземного простору, узгодження запитів і потреб різних зацікавлених груп необхідна наявність комплексного інструментарію, що ґрунтується на системному підході [68, 143], використанні можливостей технологічного передбачення [144].

1.2 Огляд підходів і методів сценарного аналізу освоєння підземного простору

Проблеми системного планування підземного простору великих міст формулювались, зокрема, в роботах Г.І. Гайка [129–132]. Зокрема, в [130] запропонована ідея природничо-геотехнічної системи «Геоурбаністика – підземне середовище», на основі якої може бути розроблений майстер-план підземного Києва, на основі розв'язання ряду науково-практичних задач: створення «банку даних» підземних об'єктів, розробки методики районування і планування, моделювання геосистеми «підземне місто – геологічне середовище», прогнозування оцінки ризиків побудови підземних об'єктів тощо. В [131, 132] ця система розглядається детальніше, з позицій комплексного транспортно-орієнтованого проєктування наземної та підземної забудови і просторової організації діяльності міста у горизонтальних і вертикальних напрямках, в той час як врахування складової геологічного середовища дозволяє при цьому оцінювати ризики, пов'язані з інженерно-геологічними процесами. Рациональне використання підземного простору передбачає ефективне управління 4 видами ресурсів [18] –

власне підземний простір, геологічний матеріал, геотермальна енергія, ґрунтові води.

Огляд типових елементів системного підходу до підземного міського планування зроблено в [118], виділено такі компоненти, як:

– стратегії: майстер-плани [15], круговий процес планування [53, 54] (постійне оновлення критеріїв на основі вже виконаних проєктів і аналізу прийнятих рішень, з метою раціонального використання підземних ресурсів), системи підтримки прийняття рішень;

– інструменти: залучення зацікавлених сторін [116], карти потенціалів, сценарний аналіз;

– методики оцінювання і порівняння.

Важливим компонентом системного підходу є оцінка сприятливості геологічного середовища будівництву підземних об'єктів. Цій проблемі присвячена, зокрема, стаття [133], в якій пропонується методика на основі використання геоінформаційних систем, типізації та районування геологічного середовища мегаполісу, врахування змінності властивостей усієї товщі інженерно-геологічного середовища для побудови схем оцінки сприятливості геологічного середовища освоєнню підземного простору. В статті [41] пропонується схожа ідея розмітки карт потенціалів підземного будівництва з урахуванням існуючих наземних об'єктів.

В дослідженні [63] аналізуються передумови використання підземного простору в різних містобудівельних сценаріях. Враховується зонування міського простору і необхідні елементи об'єкта будівництва (доступність громадського транспорту, інженерні комунікації, склади, паркувальні місця тощо). Хоча дослідження є емпіричним, без строго математичного підґрунтя, за його результатами будівництво підземних об'єктів є доцільним у 75% розглянутих випадків.

В [52] пропонується методика «міського геокліматичного відбитку», яка оцінює вплив міста на інженерно-геологічну ситуацію навколо міста, враховуючи глибинні і поверхневі геологічні процеси, тиск тощо, що дозволяє порівняти міста

за їх унікальними характеристиками взаємодії з геологічним середовищем. Виділені 4 групи міст, в яких якісно відрізняється геологічна ситуація, що потрібно враховувати в процесах освоєння підземного простору.

Інтегрована система підтримки прийняття рішень, що враховує інтереси сторін для забезпечення стабільного постачання міських ресурсів (продукти, вода, енергія), пропонується в [28]. На основі багатокритеріального підходу, застосування елементів теорії ігор із коаліціями тут формується множина Парето рішень, за рахунок яких забезпечується баланс у потребах зацікавлених організацій (наприклад, між соціальним і екологічним компонентами).

Дуже ілюстративним прикладом комплексного підходу до освоєння підземного простору є створення підземного майстер-плану м. Гельсінкі [117], де такий план створювався протягом шести років з 2004 по 2010 на основі всебічних обговорень серед залученх до процесу організацій, і включав ряд чітко визначених кроків і принципів, що дозволило створити унікальне підземне «місто-дублер».

Окрім концептуальних і організаційних аспектів, важливою складовою системного освоєння підземного простору мегаполісів є використання методологічних інструментів, зокрема, системного аналізу [68, 143]. Існує значна кількість наукових робіт, де використовувались різноманітні підходи до задач аналізу і планування міського підземного простору.

В статті [110] для оцінювання сталого розвитку м. Варшава був запропонований метод TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution, [45]), в якому враховувались 48 індикаторів-критеріїв: 16, що відповідали економічному виміру, 18 – соціальному, 14 – екологічному. За допомогою цієї методики автори оцінили зміну стану міста протягом десяти років, і дійшли висновку, що в середньому показники сталого розвитку міста зростали як за кожним виміром окремо, так і в агрегованій оцінці. Хоча метод TOPSIS, як правило, застосовується для прийняття рішень, в даному випадку він використовувався виключно для отримання узагальненої аналітичної оцінки стану міста.

Проста багатокритеріальна процедура оцінювання проєктів розглядається в [56]. В статті порівнюються 8 міських проєктів, що оцінені за сімома критеріями. Для узагальнення і отримання оцінок альтернатив пропонується елементарна процедура нормалізації і лінійної згортки з досить вільним зважуванням критеріїв. Така процедура не може претендувати на науковість або системність, однак є легко зрозумілою для ОПР, що також важливим при створенні більш досконалих інструментів оцінювання.

Також достатньо проста багатокритеріальна процедура оцінювання альтернативних ділянок підземного будівництва наводиться в [86]; відмінною рисою цього дослідження є розгляд ділянки у тривимірному просторі, що дозволяє більш точно охарактеризувати інженерно-геологічне середовище ділянки потенційного будівництва.

В [126] використовується проста процедура оцінювання парними порівняннями геологічних критеріїв, за допомогою якої виконується розмітка мапи потенціалів підземного будівництва.

В [155] використовується метод BOCR [75, 76] у поєднанні з методом аналізу ієрархій [96, 98] для оцінювання пріоритетності альтернатив рішень щодо побудови автомобільних тунелів у м. Києві. Особливістю дослідження було агрегування пріоритетів на основі мережі підтримки прийняття рішень з урахуванням факторів BOCR (Benefits – доходів, Opportunities – можливостей, Costs – витрат, і Risks – ризиків) шляхом експертного оцінювання парними порівняннями.

Метод аналізу ієрархій/мереж у поєднанні з TOPSIS використовувався також у [27] для оцінювання альтернативних локалізацій багатофункціональних підземних тунелів. Використовувались 12 критеріїв, які оцінювались, у тому числі, за допомогою геоінформаційних систем. На основі трьох дещо відмінних підходів були отримані ранжування пріоритетності десяти альтернативних локалізацій тунелів. В [57] для подібної задачі був застосований метод аналізу мереж [98] із 6 взаємозалежними кластерами.

Схожа задача використовувалась в [11]. Тут для тієї ж мети був застосований метод аналізу ієрархій з елементами методу Делфі [31, 43, 95], альтернативи оцінювались за чотирирівневою ієрархією, в якій окрім семи загальних критеріїв (фінансовий, безпековий, управлінський тощо) на окремому рівні розглядались також п'ять різних геомеханічних способів побудови тунелю.

Геологічні ризики в побудові підземних об'єктів системно розглядаються в [66], де для цього застосовується нечіткий метод аналізу ієрархій, що є суттєвим удосконаленням попередніх досліджень, оскільки геомеханічні характеристики підземного середовища змінюються в просторі і часі, і тому при описі їх точковими оцінками задача може бути надмірно спрощена. Залучення нечітких оцінок дозволяє частково вирішити цю проблему.

В статті [20] проблема підземного містобудування розглядається в соціально-психологічному розрізі сприйняття підземних об'єктів людиною. Оцінювання альтернатив підземних транспортних вузлів здійснюється комплексно, на основі інтегральної оцінки функціональних, структурних, психологічних аспектів. На основі опитування користувачів була навчена нейронна мережа, що дозволило побудувати інструмент аналізу певних будівельних рішень і пропозицій щодо їх покращення.

Важливу роль у забезпеченні функціонування міста відіграє захист критичної інфраструктури, що є особливо актуальним для українських міст. В [55] для цього пропонується використовувати методологію цифрових двійників [6, 32, 72] для моніторингу, виявлення, вивчення, передбачення загроз, пов'язаних із критичною інфраструктурою і організаціями. Детально розглядаються алгоритми і стратегії оцінювання заходів запобігання ризику в різних сценаріях на основі взаємодії з цифровими двійниками.

Поєднання методу TOPSIS і Байєсівських мереж використовується в [112] для оцінювання сценаріїв негативних подій в автомобільних тунелях. Побудована модель дозволяє оптимізувати сценарії реагування на несприятливі події (наприклад, пожежі), використовуючи для оцінювання розгалужену Байєсівську

мережу для ймовірнісного аналізу. Для отримання вхідних оцінок в моделі використовується експертне опитування.

В [71, 79, 80] розглядаються процеси освоєння підземного простору з використанням імпульсного когнітивного моделювання. Такий підхід дозволив оцінити поведінку складної геоурбаністичної системи в умовах внутрішніх і зовнішніх впливів, управлінських імпульсів, врахувати геологічні, техногенні, структурно-функціональні фактори у процесах підземного будівництва. Зокрема, було побудовано і проаналізовано декілька сценаріїв різного ступеню сприятливості. В [71] на основі цієї методології розглядаються сценарії захисту об'єктів критичної інфраструктури за допомогою підземного будівництва.

Незважаючи на те, що в наведених дослідженнях часто досить успішно розглядаються окремі задачі підземної урбаністики, в них дуже рідко згадується характерна риса процесів освоєння підземного простору, а саме суттєва ситуаційна невизначеність, пов'язана як із відсутністю необхідної інформації або неможливістю її отримати (в тому числі, якщо об'єкт дослідження – місто – розглядається в майбутньому), так і з різноманітням конфігурацій об'єкту дослідження, викликаним його просторовою і часовою гетерогенністю, наявністю конфліктуючих зацікавлених сторін. В більшості досліджень проблема невизначеності або обходиться за рахунок використання і аналізу виключно відомої об'єктивної інформації – наприклад, статистики (що дає обмежені можливості по прогнозуванню майбутнього, яке не може бути представлене як пряме продовження минулих тенденцій), або враховується неявно методами підтримки прийняття рішень із використанням експертного оцінювання. При цьому для врахування невизначеностей може бути використаний метод морфологічного аналізу, застосування якого для урбаністичних задач детально розглядається у наступному розділі.

1.3 Стан розвитку методу морфологічного аналізу в задачах прийняття рішень і дослідження стратегій

Метод морфологічного аналізу був формалізований і систематизований Ф. Цвіккі в 1967 р. [128], і з тих пір активно використовувався як в задачах винахідництва, пошуку і вдосконалення технічних та інших систем [91, 140, 147, 148], так і в задачах моделювання сценаріїв, оцінювання стратегій тощо [90, 93, 94]. Зокрема, в [92] наводиться перелік із 52 морфологічних моделей, побудованих для різних галузей, включаючи сценарії розвитку житлового будівництва, менеджменту відходів тощо. Також огляд більше ніж 70 різноманітних морфологічних досліджень наводиться в [2], демонструючи таким чином універсальність методу і практичні ефекти від його застосування.

В [124] використовується метод морфологічного аналізу для синтезу рішень щодо концепцій будівництва. Метод морфологічного аналізу розглядається в першу чергу як пошуковий метод, що дає змогу на основі відомих класифікацій і ідей для будівництва створити нові комбінації, які раніше не існували.

Метод морфологічного аналізу у поєднанні з експертним оцінюванням на основі шкали Сааті [96, 97] пропонується в [58] для конструювання рішення щодо проекту розумного будинку у відповідності до потреб клієнта. Хоча задача, яка тут ставиться – це також задача морфологічного пошуку, однак залучення оціночної інформації від експертів для отримання кількісного представлення результату є перспективним.

В [46] метод морфологічного аналізу використовується як допоміжний інструмент для економічної оцінки і прогнозування вартості проектів. Як морфологічний об'єкт розглядається варіант дизайну (в прикладі зі статті – квартири), і на основі оцінювання елементів і морфологічного синтезу виконується комплексна оцінка орієнтовної вартості.

Стаття [42] розглядає ММА як засіб опису сценаріїв, пов'язаних із протидією негативним кліматичним змінам. На основі 7 параметрів, що описують ключові фактори кліматичних змін і реакцію суспільних інституцій щодо них формуються

три сценарії, і обговорюються їх сильні і слабкі сторони. На основі цього прикладу можна добре побачити, як метод виступає інструментом структуризації складності проблеми. Схожий підхід до використання ММА застосовується в роботі [85] для побудови і обговорення сценаріїв опалення житлових будинків у містах (зокрема, м. Біла Церква).

В статті [3] за допомогою ММА розглядаються сценарії енергопостачання житлових будинків. Цікавою особливістю даного дослідження є використання простої МВЗАП для фільтрування кількості конфігурацій, які є основами сценаріїв. На основі рівнянь для попиту на енергію проводиться оцінка енергетичного балансу у кожному зі сценаріїв, вибір пріоритетних конфігурацій.

Сценарії появи електричного транспорту в Сан-Паулу за допомогою ММА досліджуються в [9]. Побудована обширна і всеохоплююча морфологічна таблиця, однак дослідження виконується без прийняття рішення і без використання математичного апарату. Більш ґрунтовний аналіз транспортної системи виконано в [113], де здійснюється статистичний аналіз на основі морфологічної таблиці з 18 параметрів, що описують характеристики автомобілів, руху транспорту, стану доріг і транспортної системи в цілому. Такий підхід є достатньо результативним, хоча статистичний аналіз може бути незастосовний в інших задачах, де до МТ залучаються параметри, щодо яких складно отримати об'єктивну оцінку.

Ще одна робота, де розглядається транспортна система міста – [19]. В ній описуються 57 параметрів, які впливають на функціонування міської транспортної мережі, які узагальнюються в 7 факторів PASENGR (Price – ціна, Access – доступність, Safety – безпека, Earth friendly – екологічність, ease of Negotiation – легкість взаємодії, Grade of comfort – зручність, Reliability – надійність). За допомогою побудованої на основі цих параметрів МТ пропонується оцінювати поточний стан, і потенційні переходи стану міста, для конструювання стратегій, які б сприяли досягненню бажаного стану.

Комплексний підхід до побудови сценаріїв автоматизації, електрифікації і цифровізації транспортного сектору в містах описаний у [88]. Проблема

транспорту розглядається за допомогою всеохоплюючої морфологічної таблиці з 23 параметрів. Однак морфологічний аналіз тут використовується виключно як спосіб структуризації складної проблеми, без аналітичних можливостей.

Велика кількість практичних прикладів застосування морфологічного підходу до проблеми громадського транспорту в місті наводиться в [22], причому процес дослідження і розв'язання задач наводиться повністю, від аналізу умов і контексту, до вибору конфігурацій і прийняття рішень щодо стратегії. Загальний морфологічний аналіз (General Morphological Analysis, GMA) тут описується як метод, що дозволяє вдосконалити організаційні системи для зменшення чи усунення їх слабких сторін, розроблення кращих стратегічних опцій, підвищення стійкості стратегій компаній; а також структуроване визначення критичних елементів, що впливають на сталість рішень, і дозволяє ОПР структурувати ідеї і цілі. Однак морфологічний аналіз тут розглядається як організаційна процедура, без залучення кількісного аналізу.

Стратегіям зменшення ризиків під час катастроф присвячена стаття [51]. В ній використовується двоетапна процедура ММА [89] із залученням матриці зв'язків з бінарними значеннями «Так»/«Ні», а також із ваговими коефіцієнтами критеріїв для підтримки прийняття рішень щодо сценарію.

Застосування ймовірнісного апарату в ММА пропонувалось у [84] для задач конструювання технічних систем. Комбінації альтернатив в рамках побудови технічної системи оцінюються за шкалою від 0% до 100% сумісності, таким чином даючи змогу оцінити придатність конфігурації системи в цілому. Такий підхід дещо схожий на матрицю взаємозв'язків, запропоновану автором дисертації раніше у [158], однак має іншу галузь застосування, і не враховує можливі підсилюючі зв'язки між альтернативами.

Частково подібна до матриці взаємозв'язків концепція оцінювання можливості реалізації конфігурацій морфологічної таблиці (сценаріїв) була розроблена також у [108], де ймовірнісний апарат не застосовувався, натомість для оцінювання сумісності альтернатив використовувалась матриця з оцінками від -3 до +3, і для конфігурацій в цілому виводилась інтегральна оцінка.

В роботі [120] розглядається підхід до оцінки терористичних загроз з точки зору методу морфологічного аналізу, і за допомогою методології Байєсівських мереж оцінюються ймовірності різних конфігурацій терористичних атак. При цьому як суб'єкт, так і об'єкт атаки подаються абстрактно, без прив'язки до реальних сутностей. В цілому, застосування ММА у поєднанні з Байєсівськими мережами є досить перспективним підходом, який досліджувався також у [17]. Представлення параметрів МТ як вузлів Байєсівської мережі дає змогу застосувати математичний апарат для оцінювання об'єкта морфологічного дослідження, проте має невід'ємний недолік, пов'язаний із тим, що між параметрами МТ встановлюються односторонні причинні зв'язки, але це часто є надмірним спрощенням, оскільки об'єкт виникає цілісно, як готова конфігурація значень параметрів, які не завжди можна адекватно сформулювати у вигляді причинно-наслідкового ланцюжка.

В рамках кандидатської дисертації [165] було запропоновано модифікацію методу морфологічного аналізу, що використовує математичний апарат для системного оцінювання множини варіантів об'єкта на основі морфологічної таблиці, і конструювання рішення, які доцільно приймати в умовах невизначеності конфігурації об'єкта (в разі використання двоетапної процедури методу). Цей підхід був успішно використаний для ряду задач, зокрема сценарного аналізу затримок і простоїв в транспортній системі великого підприємства [159], побудови сценаріїв уникнення аварійних ситуацій [158], дорожніх заторів.

Отримані результати використання цієї модифікації методу показали, що метод є дуже корисним аналітичним інструментом в задачах підтримки прийняття рішень, сценарного аналізу, дослідження стратегій, який має широкий потенціал для використання в різних галузях людської діяльності.

1.4 Системний підхід до створення інструментарію освоєння підземного простору

Розроблений в рамках кандидатської дисертації [165] двоетапний МММА, хоча і є потужним методом системного аналізу, може застосовуватись переважно для локальних задач, пов'язаних із одним класом об'єктів, щодо якого приймається рішення. В підрозділі 1.1 було показано, що проблема освоєння підземного простору мегаполісів є системною, з великою кількістю факторів і задіяних сутностей, наявністю ризиків, суттєвою невизначеністю і недосконалістю вхідної інформації. Врахування всіх ключових впливів в задачах прийняття рішення щодо підземної урбаністики в рамках 1–2 морфологічних таблиць є недоцільним, і до того ж методологічно складним або навіть неможливим, враховуючи неповноту, неточність, нечіткість інформації.

Для розширення, вдосконалення, масштабування інструментарію системного аналізу пропонується системний підхід, схематично зображений на рис. 1.1.

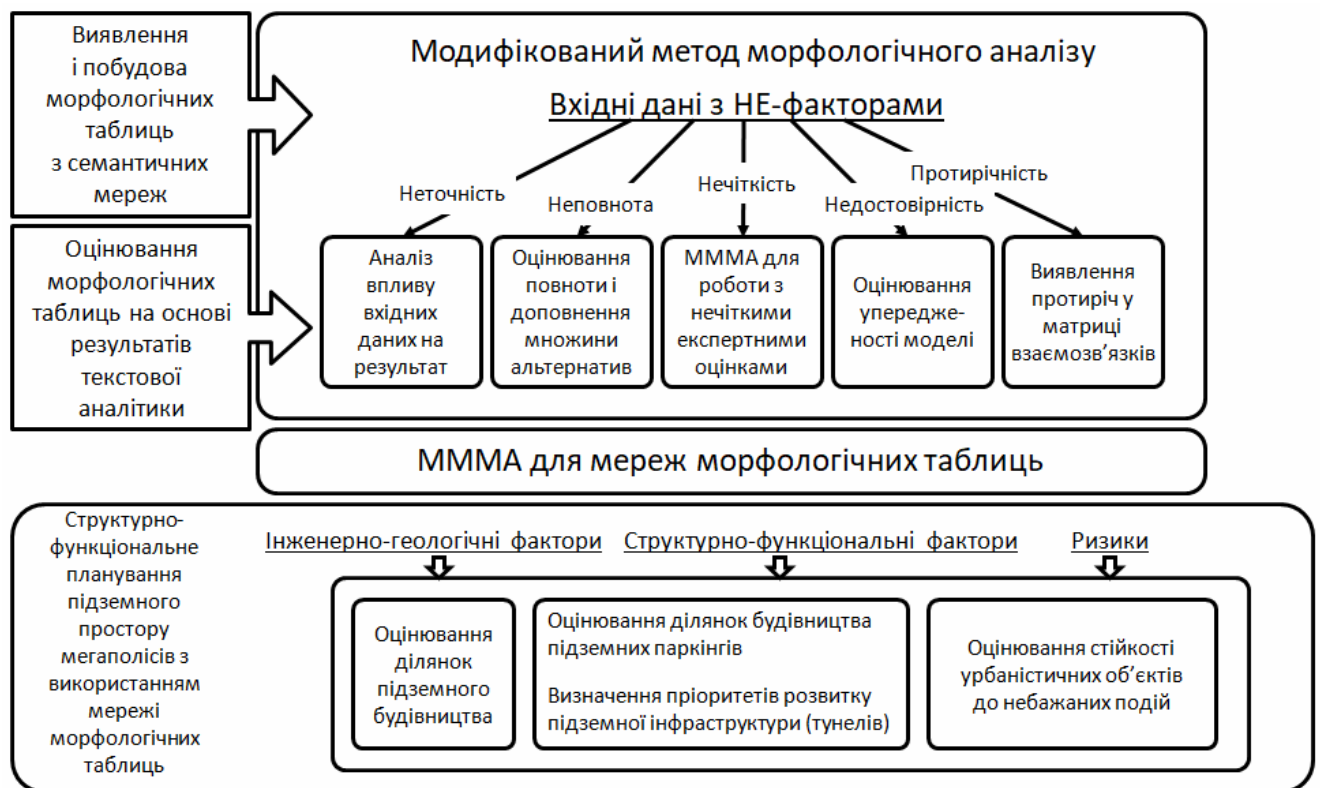


Рисунок 1.1 – Системний підхід до створення інструментарію освоєння підземного простору

В рамках цього системного підходу:

1) розробляються інструменти, що дозволяють використовувати МММА в умовах вхідних даних із так званими «НЕ-факторами»: неточністю, нечіткістю, неповнотою, недостовірністю, протирічністю. При цьому потрібно враховувати, що кожен із цих факторів несе в собі різні виклики для методу системного аналізу, тому розробляються окремі методи, процедури, прийоми, алгоритми роботи з різними факторами недосконалості;

2) зважаючи на кількість і складність даних та знань, пов'язаних із задачами освоєння підземного простору, розробляються інструменти, що інтегрують МММА в процес передбачення за рахунок напівавтоматизованої побудови морфологічних таблиць із семантичних мереж, використовуючи знання, отримані на етапі попереднього вивчення проблеми; підходи до оцінювання морфологічних таблиць на основі текстової аналітики для зменшення навантаження на експертів і підвищення об'єктивності оцінок;

3) МММА масштабується для комплексних задач, що містять декілька сутностей (класів сутностей), за рахунок використання мереж морфологічних таблиць. Двоетапна процедура МММА узагальнюється для випадку набору морфологічних таблиць, пов'язаних односторонніми і двосторонніми зв'язками;

4) розроблений апарат використовується для побудови моделей розв'язання практичних задач підземної урбаністики з поступовим їх ускладненням: розглядаються задачі оцінювання ділянок для підземного будівництва з урахуванням тільки інженерно-геологічних факторів; далі задача поскладнюється розглядом конкретного типу підземного об'єкта, що вимагає долучення також структурно-функціональних факторів; далі враховуються ризики, пов'язані з впливом небажаних подій на об'єкт; отримані моделі інтегруються для створення комплексної моделі структурно-функціонального планування підземного простору мегаполісів.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ РОБОТИ З НЕТОЧНИМИ, НЕПОВНИМИ, НЕДОСТОВІРНИМИ, ПРОТИРІЧНИМИ ДАНИМИ

Задачі, які доцільно розглядати методами системного аналізу, в тому числі задача освоєння підземного простору мегаполісів, є складно формалізованими, тобто інформації щодо об'єктів дослідження притаманний ряд характеристик (так званих НЕ-факторів), які унеможливають їх аналіз методами традиційними дослідження операцій. Розглянемо якісні властивості інформації і їх описи, наведені в [143], а також вплив цих характеристик інформації на процедури МММА:

- невизначеність інформації, яка вказує на існування багатьох альтернативних описів ситуації. Подолання невизначеності інформації за рахунок розгляду альтернативних описів ситуації є суттю МММА, тому окремо ця властивість не розглядається;
- неточність інформації, яка свідчить про наявність інтервалу допуску чи похибки вимірювань або розрахунків для кількісних параметрів або якісних характеристик опису ситуації. В МММА неточність інформації виражається в оцінках попередньої ймовірності і оцінках матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів, які визначаються експертами за дискретною шкалою. Кількісній оцінці цієї характеристики і способам її врахування присвячено підрозділ 2.1;
- неповнота інформації, яка вказує на наявність інформаційних пропусків в описі ситуації. Для МММА такими пропусками можуть бути: відсутність параметрів або альтернатив параметрів в описі об'єкта; відсутність оцінок альтернатив параметрів; відсутність оцінок матриці взаємозв'язків. Інформаційній неповноті в МММА присвячено підрозділ 2.2;

- протирічність інформації – властивість, що свідчить про наявність кількісних або якісних характеристик, які мають значення або зміст, що протиречить іншим даним. В МММА протирічність даних може спостерігатись в матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів, в підрозділі 2.3 розглядається процедура виявлень протиріч у ній;
- нечіткість інформації – властивість, яка характеризує розпливчатість опису ситуації, коли неможливо точно визначити наявність чи відсутність деякої властивості або її точну кількісну характеристику. Для адаптації методу для роботи з нечіткими вхідними даними розроблена спеціальна модифікація із відповідним математичним апаратом, якій присвячено підрозділ 2.4;
- недостовірність інформації, яка розуміється як наявність кількісних даних або якісних характеристик, що не відповідають реальному стану речей. Виявити недостовірність даних, ґрунтуючись тільки на самих цих даних, неможливо. Однак розроблені прийоми оцінювання упередженості моделі, які дають змогу потенційно виявити невідповідність результатів реальній ситуації, і за потреби скоригувати модель. Оцінюванню упередженості моделі присвячено підрозділ 2.5.

2.1 Аналіз чутливості в модифікованому методі морфологічного аналізу

Експертне оцінювання, яке є основою методів якісного аналізу, часто є єдиним джерелом інформації щодо об'єктів передбачення, однак експертні оцінки є суб'єктивними, і відображають реальний світ лише з певним наближенням. Тому, якщо на основі результатів методів якісного аналізу приймається рішення, завжди існує можливість того, що неточність вхідних даних призведе до хибного ранжування альтернатив.

Для вирішення цієї проблеми іноді застосовують методику аналізу чутливості. Зокрема існують дослідження в цьому напрямку для методу аналізу ієрархій [146, 153]. Такий підхід дозволяє визначити, які вхідні оцінки є більш

критичними, тобто призводять до зміни рангів альтернатив у остаточному ранжуванні при менших відхиленнях. На такі оцінки необхідно звернути особливу увагу і, можливо, провести уточнююче оцінювання, оскільки ця інформація є критичною для прийняття рішення.

Подібна методика аналізу чутливості була розроблена для МММА.

2.1.1 Постановка задачі

Оцінювання чутливості виконується для процедури МММА, викладеної в [157]. В цьому методі є два різних типи оцінок, що отримуються від експертів – початкові оцінки альтернатив і значення матриці взаємозв'язків, що пов'язують альтернативи різних параметрів. Тому аналіз чутливості потрібно проводити щодо обох типів оцінок.

Постановку задачі можна сформулювати таким чином:

Дано:

- морфологічна таблиця, що містить множину характеристичних параметрів $F = \{F_i \mid i \in \overline{1, N}\}$, кожний параметр F_i описується множиною альтернатив $A_i = \{a_j^{(i)} \mid j \in \overline{1, n_i}\}$;
- незалежні ймовірності всіх альтернатив $\{p_j^{(i)} \mid i \in \overline{1, N}; j \in \overline{1, n_i}\}$, отримані від експертів;
- значення взаємозв'язків всіх пар альтернатив параметрів $\{c_{i_1 j_1, i_2 j_2} \in [0; 2] \mid i_1, i_2 \in \overline{1, N}; i_1 \neq i_2; j_1 \in \overline{1, n_{i_1}}; j_2 \in \overline{1, n_{i_2}}\}$. Зазначимо, що для простоти подальшого запису тут і далі використовуються зміщені на одиницю оцінки матриці взаємозв'язків;
- розраховані в ході процедури МММА ймовірності всіх альтернатив $\{p_j^{(i)} \mid i \in \overline{1, N}; j \in \overline{1, n_i}\}$.

Потрібно:

- визначити порогові величини $\tilde{\delta}_{j_d}^{(i_d)}(a_{j_1}^{(i_1)}, a_{j_2}^{(i_2)})$ відносної зміни незалежних ймовірностей $p_{j_d}^{(i_d)}$, які призводять до зміни ранжування в парі $(a_{j_1}^{(i_1)}, a_{j_2}^{(i_2)})$;
- визначити порогові величини $\tilde{\delta}_{i_d j_{d1} j_{d2}}^C(a_{j_1}^{(i_1)}, a_{j_2}^{(i_2)})$ відносної зміни значень матриці взаємозв'язків $c_{i_d j_{d1} j_{d2}}$, які призводять до зміни ранжування в парі $(a_{j_1}^{(i_1)}, a_{j_2}^{(i_2)})$.

2.1.2 Оцінювання чутливості для задачі з двома параметрами

Для визначення ймовірностей настання альтернатив в модифікованому методі морфологічного аналізу використовується система рівнянь для повної ймовірності, коефіцієнтами якої є значення умовної ймовірності, що апроксимуються на основі вхідних даних з урахуванням декількох умов [157]. Пропонується такий вираз для значень умовної ймовірності, що задовольняє ці умови:

$$P(a_{j_1}^{(1)} | a_{j_2}^{(2)}) = \frac{p_{j_1}^{(1)} c_{1j_1, 2j_2}}{\sum_{j=1}^{n_1} p_j^{(1)} c_{1j, 2j_2}}. \quad (2.1)$$

Введемо позначення матриці взаємозв'язків для першого і другого параметра $C_{12} = \{c_{1j_1, 2j_2} | j_1 \in \overline{1, n_1}; j_2 \in \overline{1, n_2}\}$, а також векторів значень незалежної ймовірності, отриманих від експертів $\vec{p}_i = \{p_j^{(i)} | j \in \overline{1, n_i}\}$. Також введемо позначення для матриць умовних ймовірностей:

$$P_1 = \begin{pmatrix} P(a_1^{(1)} | a_1^{(2)}) & \dots & P(a_1^{(1)} | a_{n_2}^{(2)}) \\ \dots & \dots & \dots \\ P(a_{n_1}^{(1)} | a_1^{(2)}) & \dots & P(a_{n_1}^{(1)} | a_{n_2}^{(2)}) \end{pmatrix}, \quad P_2 = \begin{pmatrix} P(a_1^{(2)} | a_1^{(1)}) & \dots & P(a_1^{(2)} | a_{n_1}^{(1)}) \\ \dots & \dots & \dots \\ P(a_{n_2}^{(2)} | a_1^{(1)}) & \dots & P(a_{n_2}^{(2)} | a_{n_1}^{(1)}) \end{pmatrix}.$$

За допомогою введених позначень, з урахуванням (2.1) матриці P_1, P_2 можна записати у вигляді

$$P_1 = \text{diag}(\vec{p}_1) \cdot C_{12} \cdot \text{diag}(C_{12}^T \cdot \vec{p}_1)^{-1}, P_2 = \text{diag}(\vec{p}_2) \cdot C_{12}^T \cdot \text{diag}(C_{12} \cdot \vec{p}_2)^{-1}. \quad (2.2)$$

Зазначимо, що через умову нормування матриці P_1, P_2 є стохастичними зліва, тобто сума елементів кожного стовпчика дорівнює одиниці.

Рівняння для визначення ймовірностей альтернатив мають вигляд

$$\begin{cases} \vec{x}_1 = P_1 \vec{x}_2; \|\vec{x}_1\| = 1; \\ \vec{x}_2 = P_2 \vec{x}_1; \|\vec{x}_2\| = 1, \end{cases} \quad (2.3)$$

де $\vec{x}_1 = \{p_j^{(1)} \mid j \in \overline{1, n_1}\}$, $\vec{x}_2 = \{p_j^{(2)} \mid j \in \overline{1, n_2}\}$. Розв'язком цієї системи будуть нормовані власні вектори матриць $P_1 P_2$ і $P_2 P_1$, що відповідають власному числу 1.

Підставимо вирази (2.2) в систему (2.3):

$$\begin{cases} \vec{x}_1 = \text{diag}(\vec{p}_1) \cdot C_{12} \cdot \text{diag}(C_{12}^T \cdot \vec{p}_1)^{-1} \vec{x}_2; \\ \vec{x}_2 = \text{diag}(\vec{p}_2) \cdot C_{12}^T \cdot \text{diag}(C_{12} \cdot \vec{p}_2)^{-1} \vec{x}_1, \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} \text{diag}(\vec{p}_1)^{-1} \cdot \vec{x}_1 = C_{12} \cdot \text{diag}(C_{12}^T \cdot \vec{p}_1)^{-1} \vec{x}_2; \\ \text{diag}(\vec{p}_2)^{-1} \cdot \vec{x}_2 = C_{12}^T \cdot \text{diag}(C_{12} \cdot \vec{p}_2)^{-1} \vec{x}_1. \end{cases} \quad (2.4)$$

Введемо заміну

$$\vec{y}_1 = \text{diag}(\vec{p}_1)^{-1} \cdot \text{diag}(C_{12} \cdot \vec{p}_2)^{-1} \cdot \vec{x}_1, \vec{y}_2 = \text{diag}(\vec{p}_2)^{-1} \cdot \text{diag}(C_{12}^T \cdot \vec{p}_1)^{-1} \cdot \vec{x}_2. \quad (2.5)$$

З урахуванням заміни (2.5) система (2.4) набуде вигляду

$$\begin{cases} \text{diag}(C_{12} \cdot \vec{p}_2) \cdot \vec{y}_1 = C_{12} \cdot \text{diag}(\vec{p}_2) \vec{y}_2; \\ \text{diag}(C_{12}^T \cdot \vec{p}_1) \cdot \vec{y}_2 = C_{12}^T \cdot \text{diag}(\vec{p}_1) \vec{y}_1, \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} \vec{y}_1 = \text{diag}(C_{12} \cdot \vec{p}_2)^{-1} \cdot C_{12} \cdot \text{diag}(\vec{p}_2) \vec{y}_2; \\ \vec{y}_2 = \text{diag}(C_{12}^T \cdot \vec{p}_1)^{-1} \cdot C_{12}^T \cdot \text{diag}(\vec{p}_1) \vec{y}_1. \end{cases} \quad (2.6)$$

В системі (2.6) тепер містяться вирази (2.2) для транспонованих матриць P_1, P_2 , тобто систему (2.6) можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \vec{y}_1 = P_2^T \vec{y}_2; \\ \vec{y}_2 = P_1^T \vec{y}_1. \end{cases}$$

Розв'язком цієї системи будуть власні вектори матриць $P_2^T P_1^T$ і $P_1^T P_2^T$, що відповідають власному числу 1. Оскільки транспоновані матриці P_1, P_2 є стохастичними, їх добуток також буде стохастичною матрицею, а стохастична матриця завжди має власний вектор $\vec{1} = (1 \ 1 \ \dots \ 1)^T$, що відповідає власному числу 1 [137].

Отже, розв'язок системи (2.3) знаходимо із таких виразів:

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= \text{diag}(C_{12} \cdot \bar{p}_2) \cdot \text{diag}(\bar{p}_1) \cdot \vec{1} = \text{diag}(C_{12} \cdot \bar{p}_2) \cdot \bar{p}_1, \\ \bar{x}_2 &= \text{diag}(C_{12}^T \cdot \bar{p}_1) \cdot \bar{p}_2.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Отримані таким чином ймовірності є ненормованими, і для отримання кінцевого результату їх ще потрібно нормувати. В подальшому позначатимемо через $x_j^{(i)}$ ненормовані величини, отримані з (2.7), а через $p_j^{(i)}$ – відповідні нормовані величини. Також зазначимо, що нормування не змінює відношення між ймовірностями альтернатив одного параметра.

Розв'язок у вигляді (2.7) дозволяє оцінити всі три види чутливості. Пронумеруємо альтернативи параметрів так, щоб для будь-яких альтернатив $a_{j_1}^{(i)}, a_{j_2}^{(i)}$, $j_1 < j_2$ параметра F_i виконувалась нерівність $p_{j_1}^{(i)} > p_{j_2}^{(i)}$. Запишемо з (2.7) відношення розрахованих ймовірностей $p_{j_1}^{(1)}, p_{j_2}^{(1)}$ альтернатив $a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(1)}$, $j_1 < j_2$ параметра F_1 :

$$\frac{p_{j_1}^{(1)}}{p_{j_2}^{(1)}} = \frac{x_{j_1}^{(1)}}{x_{j_2}^{(1)}} = \frac{p_{j_1}^{(1)}}{p_{j_2}^{(1)}} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_1,2k} p_k^{(2)}}{\sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_2,2k} p_k^{(2)}}.\tag{2.8}$$

Чутливість відносно зміни незалежної ймовірності альтернатив цього ж параметра. З (2.8) видно, що на відношення ймовірностей альтернатив $a_{j_1}^{(i)}, a_{j_2}^{(i)}$ ніяк не впливає зміна незалежних ймовірностей інших альтернатив цього ж параметра, тому має сенс змінювати тільки вхідні ймовірності цих альтернатив. Нехай значення незалежної ймовірності альтернативи $a_{j_1}^{(1)}$, отриманої від

експерта, набуває відносної зміни $\delta_{j_1}^{(1)}$, тобто $p_{j_1}^{\prime(1)} = (1 + \delta_{j_1}^{(1)})p_{j_1}^{\prime(1)}$. Тоді на основі (2.8) будемо рівняння для значення $\tilde{\delta}_{j_1}^{(1)}$, яке призведе до рівності $p_{j_1}^{(1)}$ і $p_{j_2}^{(1)}$:

$$\frac{(1 + \tilde{\delta}_{j_1}^{(1)})p_{j_1}^{\prime(1)}}{p_{j_2}^{\prime(1)}} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_1,2k} p_k^{\prime(2)}}{\sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_2,2k} p_k^{\prime(2)}} = 1,$$

звідки отримуємо

$$\tilde{\delta}_{j_1}^{(1)} = \frac{p_{j_2}^{\prime(1)}}{p_{j_1}^{\prime(1)}} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_2,2k} p_k^{\prime(2)}}{\sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_1,2k} p_k^{\prime(2)}} - 1 = \frac{p_{j_2}^{(1)}}{p_{j_1}^{(1)}} - 1. \quad (2.9)$$

Зазначимо, що $\tilde{\delta}_{j_1}^{(1)} \geq -1$, тобто завжди існує така зміна незалежної ймовірності альтернатив $a_{j_1}^{(i)}$, $a_{j_2}^{(i)}$, яка призведе до зміни їхнього ранжування.

Чутливість відносно зміни незалежної ймовірності альтернатив іншого параметра.

Розглянемо, в якому випадку поміняються місцями ранги альтернатив, якщо змінювати вхідні дані альтернатив іншого параметра. Нехай значення незалежної ймовірності альтернативи $a_d^{(2)}$, $d \in [1; n_2]$, отриманої від експерта, набуває відносної зміни $\delta_d^{(2)}$, тобто $p_d^{\prime(2)} = (1 + \delta_d^{(2)})p_d^{\prime(2)}$. Тоді на основі (2.8) будемо рівняння для значення $\tilde{\delta}_d^{(2)}$, яке призведе до рівності $p_{j_1}^{(1)}$ і $p_{j_2}^{(1)}$:

$$\frac{p_{j_1}^{\prime(1)}}{p_{j_2}^{\prime(1)}} \cdot \frac{\tilde{\delta}_d^{(2)} c_{1j_1,2d} p_d^{\prime(2)} + \sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_1,2k} p_k^{\prime(2)}}{\tilde{\delta}_d^{(2)} c_{1j_2,2d} p_d^{\prime(2)} + \sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_2,2k} p_k^{\prime(2)}} = 1.$$

З цього рівняння знаходимо

$$\tilde{\delta}_d^{(2)} = \frac{p_{j_1}^{\prime(1)} \sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_1,2k} p_k^{\prime(2)} - p_{j_2}^{\prime(1)} \sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_2,2k} p_k^{\prime(2)}}{(c_{1j_2,2d} p_{j_2}^{\prime(1)} - c_{1j_1,2d} p_{j_1}^{\prime(1)}) p_d^{\prime(2)}} = \frac{x_{j_1}^{(1)} - x_{j_2}^{(1)}}{(c_{1j_2,2d} p_{j_2}^{\prime(1)} - c_{1j_1,2d} p_{j_1}^{\prime(1)}) p_d^{\prime(2)}}. \quad (2.10)$$

Необхідно також зазначити, що оскільки значення незалежної ймовірності повинні бути додатними, на значення $\delta_d^{(2)}$ є обмеження: $\delta_d^{(2)} > -1$. Якщо вираз (2.10) дає значення $\tilde{\delta}_d^{(2)} \leq -1$, це означає, що пара альтернатив $a_{j_1}^{(i)}, a_{j_2}^{(i)}$ є стійкою відносно зміни відповідної незалежної ймовірності $p_d^{(2)}$.

Чутливість відносно зміни значень матриці взаємозв'язків. На відношення ймовірностей альтернатив $a_{j_1}^{(i)}, a_{j_2}^{(i)}$ ніяк не впливає зміна значень матриці взаємозв'язків, пов'язаних з іншими альтернативами цього ж параметра, тому є сенс досліджувати тільки зміну $c_{1j_1,2d}$ або $c_{1j_2,2d}$. Розглянемо вплив зміни значення $c_{1j_1,2d}$ на це відношення. Нехай значення матриці взаємозв'язків $c_{1j_1,2d}$ набуває відносної зміни $\delta_{1j_1,2d}^C$, тобто $c'_{1j_1,2d} = (1 + \delta_{1j_1,2d}^C)c_{1j_1,2d}$. Тоді на основі (2.8) будемо рівняння для значення $\tilde{\delta}_{1j_1,2d}^C$, яке призведе до рівності $p_{j_1}^{(1)}$ і $p_{j_2}^{(1)}$:

$$\frac{p_{j_1}^{(1)}}{p_{j_2}^{(1)}} \cdot \frac{\tilde{\delta}_{1j_1,2d}^C c_{1j_1,2d} p_d^{(2)} + \sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_1,2k} p_k^{(2)}}{\sum_{k=1}^{n_2} c_{1j_2,2k} p_k^{(2)}} = 1,$$

що дає

$$\tilde{\delta}_{1j_1,2d}^C = \frac{\sum_{k=1}^{n_2} (c_{1j_2,2k} p_{j_2}^{(1)} - c_{1j_1,2k} p_{j_1}^{(1)}) p_k^{(2)}}{c_{1j_1,2d} p_{j_1}^{(1)} p_d^{(2)}} = \frac{x_{j_2}^{(1)} - x_{j_1}^{(1)}}{c_{1j_1,2d} p_{j_1}^{(1)} p_d^{(2)}}. \quad (2.11)$$

Як і в попередньому пункті, на значення $\delta_{1j_1,2d}^C$ є обмеження: $\delta_{1j_1,2d}^C > -1$. Якщо вираз (2.11) дає значення $\tilde{\delta}_{1j_1,2d}^C \leq -1$, це означає, що пара альтернатив $a_{j_1}^{(i)}, a_{j_2}^{(i)}$ є стійкою відносно зміни відповідного значення матриці взаємозв'язків $c_{1j_1,2d}$.

2.1.3 Оцінювання чутливості для задачі з довільною кількістю параметрів

Розглянемо задачу для морфологічної таблиці з довільною кількістю параметрів. В цьому випадку система рівнянь будується на основі умовних ймовірностей конфігурацій морфологічної таблиці, записаних у вигляді

$$P(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)}) = \frac{P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)})}{\sum_{k_2=1}^{n_2} \sum_{k_3=1}^{n_3} \dots \sum_{k_N=1}^{n_N} P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{k_2}^{(2)}, \dots, a_{k_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)})}, \quad (2.12)$$

де

$$P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)}) = \prod_{m=2}^N p'_{j_m}{}^{(m)} \cdot \prod_{m=1}^{N-1} \prod_{l=m+1}^N c_{mj_m, lj_l}.$$

Система рівнянь для ймовірностей, аналогічна (2.3), у випадку трьох і більше параметрів набуває вигляду

$$\begin{cases} \vec{x}_1 = P_1 \vec{x}_2; \|\vec{x}_1\| = 1; \\ \vec{x}_2 = P_2 \vec{x}_3; \|\vec{x}_2\| = 1; \\ \dots \\ \vec{x}_{N-1} = P_{N-1} \vec{x}_N; \|\vec{x}_{N-1}\| = 1; \\ \vec{x}_N = P_N \vec{x}_1; \|\vec{x}_N\| = 1. \end{cases} \quad (2.13)$$

Елементами матриць коефіцієнтів P_i є суми умовних ймовірностей конфігурацій (2.12), що відповідають змінним. Наприклад,

$$P_1 = \begin{pmatrix} \sum_{j_3=1}^{n_3} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P(\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_{j_3}^{(3)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_1^{(2)}) & \dots & \sum_{j_3=1}^{n_3} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P(\{a_1^{(1)}, a_{n_2}^{(2)}, a_{j_3}^{(3)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{n_2}^{(2)}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{j_3=1}^{n_3} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P(\{a_{n_1}^{(1)}, a_1^{(2)}, a_{j_3}^{(3)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_1^{(2)}) & \dots & \sum_{j_3=1}^{n_3} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P(\{a_{n_1}^{(1)}, a_{n_2}^{(2)}, a_{j_3}^{(3)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{n_2}^{(2)}) \end{pmatrix}.$$

Для спрощення запису матриць коефіцієнтів P_i введемо позначення. Нехай C – багатовимірна матриця [174] розмірності N , елементами якої є добутки значень матриці конфігурацій, що відповідають всім можливим парам альтернатив із цієї конфігурації:

$$C_{j_1 j_2 \dots j_N} = \prod_{m=1}^{N-1} \prod_{l=m+1}^N c_{mj_m, lj_l}.$$

Введемо також позначення $C_{i_1 | i_2}$, де $i_1, i_2 \in [1; N]$ – номери параметрів, для матриці C , помноженої за відповідними вимірами на вектори незалежних ймовірностей всіх інших параметрів $p_i, i \neq i_1, i \neq i_2$. Оскільки кожне таке множення

зменшує розмірність матриці, результуюча матриця $C_{i|i_2}$ є звичайною двовимірною матрицею. Тоді, з урахуванням (2.12), матриці P_i записуються у вигляді

$$\begin{aligned} P_i &= \text{diag}(\vec{p}_i) \cdot C_{i|i+1} \cdot \text{diag}(C_{i|i+1}^T \cdot \vec{p}_i)^{-1}, i \in [1; N-1]; \\ P_N &= \text{diag}(\vec{p}_N) \cdot C_{N|1} \cdot \text{diag}(C_{N|1}^T \cdot \vec{p}_N)^{-1}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Зауважимо деякі властивості матриць $C_{i|i_2}$:

- 1) $C_{i|i_2}^T = C_{i_2|i_1}$;
- 2) $C_{i|i_2} \vec{p}_{i_2} = C_{i|i_1} \vec{p}_i, i \neq i_1$.

Розглянемо перетворення одного з рівнянь системи (2.13) з урахуванням (2.14):

$$\vec{x}_1 = \text{diag}(\vec{p}_1) \cdot C_{1|2} \cdot \text{diag}(C_{1|2}^T \cdot \vec{p}_1)^{-1} \vec{x}_2,$$

або

$$\text{diag}(\vec{p}_1)^{-1} \cdot \vec{x}_1 = C_{1|2} \cdot \text{diag}(C_{2|1} \cdot \vec{p}_1)^{-1} \vec{x}_2. \quad (2.15)$$

Вводимо заміну, аналогічну (2.5):

$$\vec{y}_i = \text{diag}(\vec{p}_i)^{-1} \cdot \text{diag}(C_{i|i+1} \cdot \vec{p}_{i+1})^{-1} \cdot \vec{x}_i, i \in [1; N-1]. \quad (2.16)$$

Враховуючи другу властивість матриць $C_{i|i_2}$, у виразі (2.16) можна підставляти замість параметра F_{i+1} будь-який інший, тобто

$$\vec{y}_i = \text{diag}(\vec{p}_i)^{-1} \cdot \text{diag}(C_{i|k} \cdot \vec{p}_k)^{-1} \cdot \vec{x}_i, i \in [1; N], k \in [1; N], k \neq i. \quad (2.17)$$

Після заміни рівняння (2.15) перетворюється на

$$\text{diag}(C_{1|2} \cdot \vec{p}_2) \cdot \vec{y}_1 = C_{1|2} \cdot \text{diag}(\vec{p}_2) \vec{y}_2,$$

або

$$\vec{y}_1 = (P_2^-)^T \vec{y}_2,$$

де $P_i^- = \text{diag}(\vec{p}_i) \cdot C_{i|i-1} \cdot \text{diag}(C_{i|i-1}^T \cdot \vec{p}_i)^{-1}, i \in [2; N], P_1^- = \text{diag}(\vec{p}_1) \cdot C_{1|N} \cdot \text{diag}(C_{1|N}^T \cdot \vec{p}_1)^{-1}$.

Такі ж перетворення виконаємо з усіма іншими рівняннями системи (2.13). В результаті отримаємо рівність $\vec{y}_i = (P_{i+1}^-)^T \cdot (P_{i+2}^-)^T \cdot \dots \cdot (P_N^-)^T \cdot (P_1^-)^T \cdot \dots \cdot (P_i^-)^T \vec{y}_i$,

тобто \vec{y}_i є власним вектором матриці $(P_{i+1}^-)^T \cdot (P_{i+2}^-)^T \cdot \dots \cdot (P_N^-)^T \cdot (P_1^-)^T \cdot \dots \cdot (P_i^-)^T$, що відповідає власному числу 1.

Матриці P_i^- , так само, як і P_i , є стохастичними зліва, оскільки вони побудовані на основі виразів для умовної ймовірності (2.12), отже транспоновані матриці $(P_i^-)^T$ є стохастичними справа. З міркувань, аналогічних міркуванням для задачі з двома параметрами, $\vec{y}_i = \vec{1}$. Відповідно, розв'язком системи (2.13) є

$$\vec{x}_i = \text{diag}(C_{ik} \cdot \vec{p}_k) \cdot \text{diag}(\vec{p}_i) \cdot \vec{1} = \text{diag}(C_{ik} \cdot \vec{p}_k) \cdot \vec{p}_i, i \in [1; N], k \in [1; N], k \neq i. \quad (2.18)$$

За допомогою (2.18) можна оцінити зміни вхідних параметрів задачі, які призведуть до зміни ранжування між альтернативами. Пронумеруємо альтернативи параметрів так, щоб для будь-яких альтернатив $a_{j_1}^{(i)}, a_{j_2}^{(i)}$, $j_1 < j_2$ параметра F_i виконувалась нерівність $p_{j_1}^{(i)} > p_{j_2}^{(i)}$. Запишемо відношення розрахованих ймовірностей $p_{j_1}^{(1)}, p_{j_2}^{(1)}$ альтернатив $a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(1)}$, $j_1 < j_2$ параметра F_1 :

$$\frac{p_{j_1}^{(1)}}{p_{j_2}^{(1)}} = \frac{p_{j_1}^{\prime(1)}}{p_{j_2}^{\prime(1)}} \cdot \frac{\sum_{k_2=1}^{n_2} \sum_{k_3=1}^{n_3} \dots \sum_{k_N=1}^{n_N} P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{k_2}^{(2)}, \dots, a_{k_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)})}{\sum_{k_2=1}^{n_2} \sum_{k_3=1}^{n_3} \dots \sum_{k_N=1}^{n_N} P'(\{a_{j_2}^{(1)}, a_{k_2}^{(2)}, \dots, a_{k_N}^{(N)}\} | a_{j_2}^{(1)})}. \quad (2.19)$$

З (2.19) за допомогою міркувань, аналогічних до задачі з двома характеристичними параметрами, отримуємо вирази, еквівалентні (2.9), (2.10), (2.11).

Чутливість відносно зміни незалежної ймовірності альтернатив цього ж параметра:

$$\tilde{\delta}_{j_1}^{(1)} = \frac{p_{j_2}^{(1)}}{p_{j_1}^{(1)}} - 1.$$

Чутливість відносно зміни незалежної ймовірності альтернатив іншого параметра. Для простоти запису візьмемо залежність від альтернативи $a_d^{(2)}$ параметра F_2 :

$$\tilde{\delta}_d^{(2)} = \frac{x_{j_1}^{(1)} - x_{j_2}^{(1)}}{\left(\sum_{k_3=1}^{n_3} \dots \sum_{k_N=1}^{n_N} \left(P'(\{a_{j_2}^{(1)}, a_d^{(2)}, \dots, a_{k_N}^{(N)}\} | a_{j_2}^{(1)}) p'_{j_2}{}^{(1)} - P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_d^{(2)}, \dots, a_{k_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)}) p'_{j_1}{}^{(1)} \right) \right) p_d'{}^{(2)}}.$$

Чутливість відносно зміни значень матриці взаємозв'язків:

$$\tilde{\delta}_{1j_1 2k}^C = \frac{x_{j_2}^{(1)} - x_{j_1}^{(1)}}{\sum_{k_3=1}^{n_3} \dots \sum_{k_N=1}^{n_N} P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_d^{(2)}, a_{k_3}^{(3)}, \dots, a_{k_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)}) p'_{j_1}{}^{(1)} p_d'{}^{(2)}}.$$

Всі властивості значень $\tilde{\delta}$ такі ж, як і для задачі з двома параметрами.

2.1.4 Приклад оцінювання чутливості

Розглянемо задачу з двома параметрами, з яких перший має три альтернативи, другий – дві альтернативи. Вхідні оцінки і матриця взаємозв'язків для задачі наведені в табл. 2.1 і табл. 2.2 відповідно. Результат розв'язання задачі наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.1 – Незалежні ймовірності альтернатив параметрів

F_1	F_2
0,2	0,7
0,5	0,3
0,3	

Таблиця 2.2 – Матриця взаємозв'язків

	$a_1^{(2)}$	$a_2^{(2)}$
$a_1^{(1)}$	1,5	1
$a_2^{(1)}$	0,5	0,5
$a_3^{(1)}$	1	0,25

Таблиця 2.3 – Розраховані ймовірності альтернатив параметрів

F_1	F_2
0,359	0,791
0,332	0,209
0,309	

Як бачимо, альтернативи пронумеровані таким чином, що результуюча ймовірність більша для альтернатив з меншим номером. Користуючись виразами (2.9), (2.10), (2.11), визначимо чутливість пар альтернатив параметра F_1 до вхідних даних з точки зору зміни рангів (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Чутливість пар альтернатив до різних елементів вхідних даних

$a_j^{(1)}$	Пара	$\tilde{\delta}_j^{(1)}$	$\tilde{\delta}_1^{(2)}$	$\tilde{\delta}_2^{(2)}$	$\tilde{\delta}_{1j21}^C$	$\tilde{\delta}_{1j22}^C$
$a_1^{(1)}$	$(a_1^{(1)}, a_2^{(1)})$	-0,075	-0,571	1,333	-0,095	-0,333
	$(a_1^{(1)}, a_3^{(1)})$	-0,139	стійка	стійка	-0,181	-0,633
$a_2^{(1)}$	$(a_2^{(1)}, a_1^{(1)})$	0,081	-0,571	1,333	0,114	-0,24
	$(a_2^{(1)}, a_3^{(1)})$	-0,069	0,514	-0,343	-0,103	0,267
$a_3^{(1)}$	$(a_3^{(1)}, a_1^{(1)})$	0,162	стійка	стійка	0,181	1,689
	$(a_3^{(1)}, a_2^{(1)})$	0,074	0,514	-0,343	0,086	0,8

З табл. 2.4 можна робити висновки щодо чутливості альтернатив. Наприклад, якщо зменшити початкову ймовірність альтернативи $a_1^{(1)}$ на 7,5% або більше, ця альтернатива поміняється місцями з другою в остаточному ранжуванні. Якщо зменшення сягне 13,9%, ця альтернатива також поміняється місцями з третьою.

Для значень пари $(a_1^{(1)}, a_3^{(1)})$ значення $\tilde{\delta}_1^{(2)}$, $\tilde{\delta}_2^{(2)}$ не перевищують -1 , тобто жодна припустима зміна ймовірностей альтернатив параметра F_2 не призведе до зміни ранжування в цій парі. Тому зроблено висновок про те, що ця пара є стійкою відносно зміни ймовірностей альтернатив параметра F_2 .

2.1.5 Оцінювання чутливості альтернатив у двоетапній процедурі МММА

Розглянемо чутливість альтернатив параметрів МТ другого етапу до зміни значень МЗАП.

Нехай на першому етапі задана МТ з N параметрами F_i , кожний з яких має n_i альтернатив $a_j^{(i)}$. В результаті розв'язання задачі МММА знайдені ймовірності кожної з альтернатив, що дорівнюють $p_j^{(i)}$, а також розраховані ймовірності

конфігурацій МТ першого етапу $P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\})$. Для простоти розглянемо на другому етапі МТ з одним параметром F_d , $d = N + 1$, що має n_d альтернатив.

Будемо розглядати зміщені на одиницю значення матриці взаємозв'язків, тобто $c_{ij,dk} \in [0; 2]$.

В розробленій модифікації методу використовуються умовні результативності альтернатив рішень при обраній конфігурації МТ першого етапу, розраховані таким чином:

$$R(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = \frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i, d1}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i, dk} \right)}. \quad (2.20)$$

Значення результативності $a_1^{(d)}$ з урахуванням можливості появи будь-якої конфігурації МТ першого етапу визначаємо в такий спосіб:

$$R(a_1^{(d)}) = \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} R(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}).$$

Для простоти запису введемо позначення $R_k \equiv R(a_k^{(d)})$.

Нехай змінюється значення $c_{i^*j^*,d1}$, яке задає зв'язок між альтернативою $a_{j^*}^{(i^*)}$ МТ першого етапу і альтернативою $a_1^{(d)}$, причому нове значення становить $c'_{i^*j^*,d1} = c_{i^*j^*,d1} + \Delta c$. Це призведе до зміни значень умовної результативності, але тільки тих, які залежать від конфігурацій, що містять $a_{j^*}^{(i^*)}$. Відповідно, певним чином зміняться і значення результативності альтернатив $a_1^{(d)}$ в цілому. Позначатимемо нові значення результативності через R'_k .

Запишемо (2.20) з урахуванням цієї зміни:

$$\begin{aligned}
R(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) &= \frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i, d1} + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i, d1}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i, dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i, d1}} = \\
&= 1 - \frac{\sum_{k=2}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i, dk} \right)}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i, dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i, d1}}.
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Відповідно, значення умовної результативності альтернатив $a_l^{(d)}$, $l \in \overline{2, n_d}$:

$$R(a_l^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = \frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i, dl}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i, dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i, d1}}. \tag{2.22}$$

Із (2.21) і (2.22) очевидно, що значення зміни умовної результативності $\Delta R_l = R'_l - R_l$ для альтернативи $a_1^{(d)}$ має той самий знак, що і значення зміни Δc , в той час як для решти альтернатив ΔR_l , $l \in \overline{2, n_d}$ має протилежний знак.

Зазначимо, що завдяки нормуванню в (2.20) для значень умовної результативності виконується рівність

$$\sum_{k=1}^{n_d} R(a_k^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = 1. \tag{2.23}$$

Відповідно, $\sum_{k=1}^{n_d} R_k = 1$ і $\sum_{k=1}^{n_d} R'_k = 1$.

Запишемо наступну очевидну рівність:

$$\sum_{k=1}^{n_d} (R'_k - R_k) = 0,$$

або

$$\sum_{k=1}^{n_d} \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} (R'(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) - R(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\})) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = 0. \tag{2.24}$$

Як було зазначено вище, нові умовні результативності відрізняються тільки для тих конфігурацій, які містять $a_{j^*}^{(i^*)}$, тому (2.24) можна записати так:

$$\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} (R'(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) - R(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\})) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = 0, \quad (2.25)$$

тобто враховувати в сумі тільки ті конфігурації, де відбувається зміна умовної результативності альтернативи $a_1^{(d)}$.

Виконаємо певні перетворення для (2.25):

$$\begin{aligned} & \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \Delta R(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = \\ & = \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \sum_{k=2}^{n_d} R(a_k^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) - \\ & - \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \sum_{k=2}^{n_d} R'(a_k^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Ліва частина суми (2.26) фактично являє собою значення ΔR_1 , оскільки для решти конфігурацій значення умовної результативності не змінюється.

Збільшимо праву частину (2.24), прибравши від'ємник, значення якого завжди є невід'ємним, а також додамо невід'ємні члени, що містять умовну результативність альтернативи $a_1^{(d)}$:

$$\Delta R_1 \leq \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_d} R(a_k^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}). \quad (2.27)$$

Враховуючи (2.23), отримаємо $\Delta R_1 \leq \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\})$.

При цьому сума ймовірностей всіх конфігурацій, що містять $a_{j^*}^{(i^*)}$, дорівнює

ймовірності цієї альтернативи: $\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = p_{j^*}^{i^*}$.

Тому $\Delta R_1 \leq p_{j^*}^{i^*}$. З аналогічних міркувань із (2.26) можна отримати

$$\begin{aligned} \Delta R_1 &\geq -\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_d} R'(a_k^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = \\ &= -\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j^*}^{(i^*)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = -p_{j^*}^{(i^*)}. \end{aligned}$$

Отже, отримали оцінку $-p_{j^*}^{(i^*)} \leq \Delta R_1 \leq p_{j^*}^{(i^*)}$, тобто жодні зміни Δc не можуть змінити повне значення результативності $a_1^{(d)}$ більше, ніж на величину ймовірності альтернативи $a_{j^*}^{(i^*)}$, розраховану на першому етапі МММА.

Рівність (2.26) можна також записати у вигляді $\Delta R_1 = -\sum_{k=2}^{n_d} \Delta R_k$. Як було зазначено вище, всі $\Delta R_k, k \in \overline{2, n_d}$ мають однаковий знак, протилежний до ΔR_1 , тому $|\Delta R_1| = \sum_{k=2}^{n_d} |\Delta R_k|$, звідки отримуємо, що $|\Delta R_k| \leq p_{j^*}^{(i^*)}$. Таким чином, зміна в різницях результативності двох альтернатив $|\Delta R_1| + |\Delta R_k| \leq 2p_{j^*}^{(i^*)}, k \in \overline{2, n_d}$.

Ця оцінка є достатньо грубою, особливо у випадках малих змін Δc , тому покажемо, що можна отримати іншу оцінку.

Запишемо різницю в результативності двох альтернатив $a_1^{(d)}, a_2^{(d)}$ при зміні $c'_{i^*j^*,d1} = c_{i^*j^*,d1} + \Delta c$, розглядаючи окремо конфігурації з альтернативою $a_{j^*}^{(i^*)}$ і без неї:

$$\begin{aligned} R'_1 - R'_2 &= \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1}} P(\{\dots\}) + \\ &+ \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{\substack{j_{i^*}=1 \\ j_{i^*} \neq j^*}}^{n_{i^*}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right)} P(\{\dots\}). \end{aligned} \quad (2.28)$$

Додамо і віднімемо до правої частини (2.28) немодифіковані величини умовної результативності, помножені на відповідні ймовірності конфігурації, що

містять $a_{j^*}^{(i^*)}$. Таким чином другий доданок перетворюється на різницю немодифікованих значень повної результативності альтернатив $a_1^{(d)}$, $a_2^{(d)}$.

$$R'_1 - R'_2 = R_1 - R_2 + P(\{\dots\}) \times \left(\prod_{j_1=1}^{n_1} \dots \prod_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \prod_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \prod_{j_N=1}^{n_N} \left(\frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1}} - \frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right)} \right) \right). \quad (2.29)$$

Після зведення до єдиного знаменника множник під знаками сум має вигляд:

$$\frac{\Delta c \left(\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} \right) \left(\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) \right) - \Delta c \left(\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} \right) \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} \right) + \Delta c \left(\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} \right) \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2} \right)}{\left(\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} \right) \left(\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) \right)} =$$

$$= \Delta c \frac{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right)} \frac{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1}} =$$

$$= \frac{\Delta c}{c_{i^*j^*,d1}} \frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right)} \frac{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1}}.$$

Враховуючи, що $\frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right)} \leq 1$, а також наведені вище перетворення, для

(2.29) можна записати нерівність:

$$\begin{aligned}
& R'_1 - R'_2 \leq \\
& \leq R_1 - R_2 + \frac{\Delta c}{c_{i^*j^*,d1}} \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \frac{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1}} P(\{\dots\}). \quad (2.30)
\end{aligned}$$

Далі виконуємо перетворення з доданком правої частини (2.30):

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta c}{c_{i^*j^*,d1}} \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \frac{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1}} P(\{\dots\}) = \\
& = \frac{\Delta c}{c_{i^*j^*,d1}} \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \left(1 + \frac{-\Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} - \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right) + \Delta c \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1}} \right) P(\{\dots\}) = \\
& = \frac{\Delta c}{c_{i^*j^*,d1}} \left(p_{j^*}^{(i^*)} + \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \frac{-(\Delta c + c_{i^*j^*,d1}) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{(\Delta c + c_{i^*j^*,d1}) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2} + \sum_{k=3}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right)} P(\{\dots\}) \right).
\end{aligned}$$

Збільшимо значення останнього виразу, прибравши зі знаменника невід'ємний член $\sum_{k=3}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^N c_{ij_i,dk} \right)$. Таким чином, маємо оцінку:

$$\begin{aligned}
& \Delta R'_{1,2} \leq \Delta R_{1,2} + \frac{\Delta c}{c_{i^*j^*,d1}} \left(p_{j^*}^{(i^*)} + \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{i^*-1}=1}^{n_{i^*-1}} \sum_{j_{i^*+1}=1}^{n_{i^*+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \frac{-(\Delta c + c_{i^*j^*,d1}) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{(\Delta c + c_{i^*j^*,d1}) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}} P(\{\dots\}) \right). \\
& \text{При цьому } \frac{-(\Delta c + c_{i^*j^*,d1}) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}}{(\Delta c + c_{i^*j^*,d1}) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^N c_{ij_i,d1} + \prod_{i=1}^N c_{ij_i,d2}} \leq 1, \text{ тому остаточно отримуємо:}
\end{aligned}$$

$$\Delta R'_{1,2} \leq \Delta R_{1,2} + 2 \frac{\Delta c}{c_{i^*j^*,d1}} p_{j^*}^{(i^*)}.$$

В результаті маємо, що при новому значенні $c'_{i^*j^*,d1} = c_{i^*j^*,d1} + \Delta c$ різниця між результативностями альтернатив $a_1^{(d)}$, $a_2^{(d)}$ не зміниться більше, ніж на $\text{Min}(2p_{j^*}^{(i^*)}, 2 \frac{\Delta c}{c_{i^*j^*,d1}} p_{j^*}^{(i^*)})$. Таке обмеження дозволяє оцінити надійність ранжування альтернатив параметра F_d .

2.1.6 Оцінювання необхідної точності вхідних даних

В МММА для прямого оцінювання попередньої ймовірності альтернатив параметрів і значень матриці взаємозв'язків використовується шкала Міллера [61], відповідно 7-рівнева і 9-рівнева. Однак дискретні значення цієї шкали відповідають інтервалам величин, тому при зведенні до точкових величин, які використовуються на вході МММА, потрібно враховувати наявність певного допуску.

Припустимість використання такого методу оцінювання можна визначити за допомогою апарату оцінювання чутливості в МММА. Згідно з цим апаратом, кожній альтернативі $a_j^{(i)}$ кожного параметра F_i відповідає набір порогових значень відносної зміни $\tilde{\delta}$, які призводять до перестановок у ранжуванні альтернатив.

Розглянемо, які саме порогові значення відповідають альтернативі:

- порогові значення $\tilde{\delta}_{j_i}^{(i)}$, $j_i \in [1, n_i]$, $j_i \neq j$, які призводять до зміни ранжування між альтернативами $a_j^{(i)}$, $a_{j_i}^{(i)}$. Ці порогові значення визначаються за формулою (2.10);
- порогові значення $\tilde{\delta}_{j_{z1}, j_{z2}}^{(z)}$, $j_{z1}, j_{z2} \in [1, n_z]$, $z \neq i$, які призводять до зміни ранжування між альтернативами $a_{j_{z1}}^{(z)}$, $a_{j_{z2}}^{(z)}$. Якщо позначити

ймовірність конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$ через P_{j_1, j_2, \dots, j_N} , то на основі (2.11) можна вивести наступні вирази для $\tilde{\delta}_{j_{z_1}, j_{z_2}}^{(z)}$:

$$\tilde{\delta}_{j_{z_1}, j_{z_2}}^{(z)} = \frac{p_{z_1}^{(z)} - p_{z_2}^{(z)}}{\sum_{k_s, s \neq z, s \neq i} \left(P_{k_1, \dots, z_2, \dots, j_i, \dots, k_N} - P_{k_1, \dots, z_1, \dots, j_i, \dots, k_N} \right)}. \quad (2.31)$$

Вираз (2.9), (2.10) описують відносну зміну вхідної ймовірності $p_j^{(i)}$. Для порівняння з допущками переведемо цю зміну в абсолютну:

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_{j_i}^{(i)} &= p_{j_i}^{(i)} \tilde{\delta}_{j_i}^{(i)} = p_{j_i}^{(i)} \left(\frac{p_j^{(i)}}{p_{j_i}^{(i)}} - 1 \right) = \frac{p_{j_i}^{(i)}}{p_{j_i}^{(i)}} (p_j^{(i)} - p_{j_i}^{(i)}); \\ \tilde{\Delta}_{j_{z_1}, j_{z_2}}^{(z)} &= p_{j_i}^{(i)} \tilde{\delta}_{j_{z_1}, j_{z_2}}^{(z)} = \frac{p_{j_i}^{(i)} (p_{z_1}^{(z)} - p_{z_2}^{(z)})}{\sum_{k_s, s \neq z, s \neq i} \left(P_{k_1, \dots, z_2, \dots, j_i, \dots, k_N} - P_{k_1, \dots, z_1, \dots, j_i, \dots, k_N} \right)}. \end{aligned}$$

Тоді найменше відхилення, за якого відбудеться зміна ранжування між будь-якими альтернативами, становить:

$$\tilde{\Delta} \min_j^{(i)} = \min \left(\min_{j_i} |\tilde{\Delta}_{j_i}^{(i)}|, \min_{z, z_1, z_2: z \neq i, z_1 \neq z_2} |\tilde{\Delta}_{z_1, z_2}^{(z)}| \right). \quad (2.32)$$

В багатьох задачах, зокрема з великими морфологічними таблицями, величина $\tilde{\Delta} \min_j^{(i)}$ може виявитись досить малою, тому більш актуальним може стати розгляд випадку, коли відбувається зміна ранжування тільки між альтернативами, одна з яких є найкращою для свого параметра. В цьому випадку у виразі (2.32) потрібно враховувати тільки такі перестановки, де одна з альтернатив є найбільш вагомою для свого параметра.

Нехай в якості попередньої оцінки альтернативи $a_j^{(i)}$ експерт обирає рівень шкали Міллера $s_j^{(i)}$, якому відповідає інтервал $[l_j^{(i)}, u_j^{(i)}]$, при цьому в якості вхідного значення обирається $p_j^{(i)} = (u_j^{(i)} + l_j^{(i)})/2$. Допуском рівня $s_j^{(i)}$ буде величина $d_j^{(i)} = (u_j^{(i)} - l_j^{(i)})/2$.

Між значеннями $p_j^{(i)}$ і $p_j^{(i)}$ відповідність така:

$$p_j^{(i)} = \frac{p_j^{n(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} p_j^{n(i)}}. \quad (2.33)$$

Для забезпечення відсутності зміни ранжування повинні виконуватись нерівності:

$$p_j^{(i)} + \tilde{\Delta} \min_j^{(i)} \geq \frac{p_j^{n(i)} + d_j^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} p_j^{n(i)}}; \quad p_j^{(i)} - \tilde{\Delta} \min_j^{(i)} \leq \frac{p_j^{n(i)} - d_j^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} p_j^{n(i)}}.$$

Після перетворень і врахування (2.33) з обох нерівностей отримуємо:

$$\tilde{\Delta} \min_j^{(i)} \geq \frac{d_j^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} p_j^{n(i)}}. \quad (2.34)$$

Якщо нерівність (2.34) виконується, точність вхідних даних достатня для забезпечення адекватності результатів МММА. Якщо ця нерівність не виконується, необхідні процедури уточнення вхідних даних, зокрема використання парних порівнянь для оцінки альтернатив параметрів [141]. Зазначимо, що це доцільно робити тільки для тих параметрів, у яких є альтернативи, що не забезпечують виконання нерівності (2.34).

Окремо потрібно розглянути точність оцінювання матриці взаємозв'язків. Апарат оцінювання чутливості МММА дає таку оцінку порогової зміни $\tilde{\delta}_{ij_1 z k_z}^C$, що призводить до перестановки у ранжуваннях між альтернативами $a_{j_1}^{(i)}$ і $a_{j_2}^{(i)}$:

$$\tilde{\delta}_{ij_1 z k_z}^C = \frac{p_{j_1}^{(i)} - p_{j_2}^{(i)}}{\sum_{k_s, s \neq z, s \neq i} P_{k_1, \dots, k_z, \dots, j_1, \dots, k_N}}.$$

Переводимо відносну зміну $\tilde{\delta}_{ij_1 z k_z}^C$ в абсолютну: $\tilde{\Delta}_{ij_1 z k_z}^C = c_{ij_1 z k_z} \tilde{\delta}_{ij_1 z k_z}^C$.

Мінімальна порогова зміна для деякого значення $c_{ij_1 z k_z}$ становитиме:

$$\tilde{\Delta}^C \min_{ij_1 z k_z} = \min \left(\min_{j, j \neq j_i} |\tilde{\Delta}_{ij z k_z}^C|, \min_{k, k \neq k_z} |\tilde{\Delta}_{ij_i z k}^C| \right).$$

Оцінки матриці взаємозв'язків не нормуються, тому умовою достатньої точності буде:

$$\tilde{\Delta}^C \min_{ij, zk_z} \geq d_{ij, zk_z}^C,$$

де d_{ij, zk_z}^C – допуск для значення c_{ij, zk_z} у відповідній шкалі оцінювання.

2.1.7 Аналіз впливу вхідних даних на результат

Аналіз чутливості в МММА дає змогу визначити, як впливає зміна вхідних даних на результат. Однак в реальних задачах іноді виникає дещо інша задача – дослідити, які саме із параметрів або альтернатив, або їх взаємозв'язків спричинили появу певного результату. Таким чином, якщо окремі результати є неінтуїтивними, підозрілими або неадекватними, аналітик чи особа, що приймає рішення, може з'ясувати, чому отримано саме такий результат і в разі необхідності повернутися до коригування вхідних даних або уточнення формулювань в опитувальних формах.

Отже, нехай ми хочемо дослідити, які альтернативи інших параметрів найбільше вплинули на деяку альтернативу $a_j^{(i)}$. Розпишемо результуючу ймовірність $p_j^{(i)}$ альтернативи $a_j^{(i)}$, використовуючи введене раніше позначення ймовірності конфігурації:

$$p_j^{(i)} = \frac{\sum_{k_s, s \neq i} P_{k_1, \dots, k_i, \dots, k_N}}{\sum_{k_s} P_{k_1, \dots, k_N}}.$$

В чисельнику можна виділити групи доданків відповідно до альтернатив $a_k^{(z)}$, $k \in [1, n_z]$ параметра F_z , вплив якого ми хочемо перевірити:

$$p_j^{(i)} = \frac{\sum_{k_s, s \neq i, s \neq z} P_{k_1, \dots, i, \dots, 1, \dots, k_N} + \sum_{k_s, s \neq i, s \neq z} P_{k_1, \dots, i, \dots, 2, \dots, k_N} + \dots + \sum_{k_s, s \neq i, s \neq z} P_{k_1, \dots, i, \dots, n_z, \dots, k_N}}{\sum_{k_s} P_{k_1, \dots, k_N}}. \quad (2.35)$$

З (2.35) впливає величина абсолютного внеску $\Phi_{ij, zk}^{abs}$ альтернативи $a_k^{(z)}$ до ймовірності альтернативи $a_j^{(i)}$:

$$\Phi_{ij,zk}^{abs} = \frac{\sum_{k_s, s \neq i, s \neq z} P_{k_1, \dots, i, \dots, k, \dots, k_N}}{\sum_{k_s} P_{k_1, \dots, k_N}}.$$

Показник абсолютного внеску є найбільш наближеним до конкретної задачі, яка розглядається; сума абсолютних внесків $\Phi_{ij,zk}^{abs}$ при $k \in [1, n_z]$ складає ймовірність альтернативи $a_j^{(i)}$. Однак ця величина має істотний недолік, пов'язаний з тим, що $\Phi_{ij,zk}^{abs}$ прямо пропорційний величині незалежної ймовірності $p_k^{(z)}$ альтернативи $a_k^{(z)}$. Тому цей показник відображає одночасно як важливість альтернативи $a_k^{(z)}$ для розрахунку $a_j^{(i)}$, так і саму величину $p_k^{(z)}$. Якщо потрібно дослідити саме важливість $a_k^{(z)}$ для розрахунку $a_j^{(i)}$, є сенс розглянути відносний внесок $\Phi_{ij,zk}^{rel}$, який розраховуємо таким чином:

$$\Phi_{ij,zk}^{rel} = \frac{\Phi_{ij,zk}^{abs}}{p_j^{(i)}}.$$

Показник відносного внеску певною мірою є аналогом чутливості, оскільки він описує, наскільки сильно зміна вхідної ймовірності $p_k^{(z)}$ впливатиме на результуючу ймовірність $p_j^{(i)}$. Порівнюючи $\Phi_{ij,zk}^{rel}$ для різних альтернатив $a_k^{(z)}$, можна дізнатися, які з них є більш впливовими щодо альтернативи $a_j^{(i)}$, тобто між якими альтернативами є більш тісний зв'язок в рамках розглядуваної задачі.

Показник $\Phi_{ij,zk}^{rel}$ бере до уваги вхідні дані решти параметрів задачі, що робить значення матриці взаємозв'язків, пов'язані з $a_j^{(i)}$ і $a_k^{(z)}$, більш або менш вагомими в залежності від ваг альтернатив різних параметрів. Цікавим може бути також дослідження зв'язку між альтернативами $a_j^{(i)}$ і $a_k^{(z)}$ незалежно від конкретної задачі, спираючись тільки на значення матриці взаємозв'язків. Для цього введемо показник модельного внеску $\Phi_{ij,zk}^{model}$:

$$\Phi_{ij,zk}^{model} = \frac{n_z \sum_{k_s, s \neq i, s \neq z} C_{k_1, \dots, i, \dots, k, \dots, k_N}}{\sum_{k_s} C_{k_1, \dots, k_N}},$$

де $C_{j_1, j_2, \dots, j_N} = \prod_{m=1}^{N-1} \prod_{l=m+1}^N (c_{mj_m, lj_l} + 1)$ – добуток всіх зміщених значень матриці взаємозв'язків, що відповідають конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$. Значення $\Phi_{ij,zk}^{model}$ не прив'язані до конкретної задачі і описують зв'язок між $a_j^{(i)}$ і $a_k^{(z)}$ в цілому, даючи змогу оцінити внесок $a_k^{(z)}$ в оцінку альтернативи $a_j^{(i)}$ взагалі, для всього класу розглядуваних об'єктів.

2.2 Процедури оцінювання повноти вхідних даних і доповнення множини альтернатив

Проаналізуємо всі вхідні дані, які присутні в МММА. Це, по-перше, структурні, які описують власне об'єкт дослідження – тобто морфологічна таблиця, включаючи її параметри і альтернативи; і, по-друге, числові – незалежні оцінки альтернатив, і оцінки МВЗАП. Класифікація наведена на рис. 2.1.

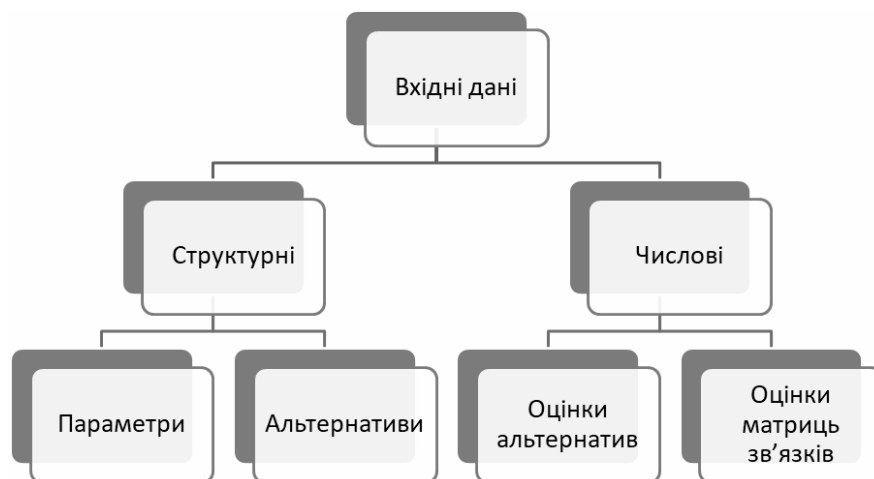


Рисунок 2.1 – Класифікація вхідних даних в МММА

Варто зазначити, що про повноту множини параметрів МТ немає сенсу говорити, оскільки множина параметрів завжди буде неповною – розрізів класифікації для одного об'єкта може бути безліч, їх кількість обмежується тільки

уваюю і знаннями дослідника. З іншого боку, повнота множини альтернатив є важливою умовою використання математичного апарату МММА, тому це питання потребує особливого дослідження, яке наведено в п. 2.2.3. Також через різні обставини оціночна інформація може бути неповною, і прийоми її врахування описані в п. 2.2.1.

2.2.1 Алгоритм доповнення вхідної оціночної інформації

В МММА вхідна оціночна інформація поступає, як правило, від експерта (інші способи отримання вхідної інформації, описані в Розділі 3, тут не розглядаються, оскільки причини пропусків, що розглядаються в цьому пункті, не актуальні для автоматизованих процедур). Відповідно, деякі оцінки можуть бути пропущені, з однієї з наступних причин:

1. Неуважність або помилка експерта – експерт ненавмисно пропустив питання в опитувальній формі.
2. Експерт відмовився відповідати через неоднозначність або складність питання, відсутність знань щодо цього питання, або його нерозуміння.
3. Експерт відмовився відповідати на питання, оскільки вважає його недоцільним або безглуздим.

Виправлення ситуації суттєво залежить від того, яка саме із причин призвела до неповноти інформації, тому в ідеальному випадку, якщо є зворотний зв'язок з експертом, то варто уточнити, що саме стало причиною пропуску. Якщо це неуважність або помилка, то експерт дає відповідь на пропущене питання; в іншому випадку, в залежності від пояснень, виконуються такі дії:

– якщо питання неоднозначне або складне, ставиться максимально нейтральна оцінка, яка в подальшому буде уточнена за рахунок процедури МММА: середнє значення шкали Міллера для оцінки альтернативи, або нульове значення для оцінки МВЗАП або МЗАП;

– якщо питання безглузде або недоцільне, ставиться оцінка, яка призведе до мінімальної її участі в подальших процедурах: мінімальна оцінка шкали Міллера для оцінки альтернативи, або значення «-1» для оцінки МВЗАП або МЗАП.

У випадку якщо немає можливості уточнити причину у експерта, аналітик приймає рішення самостійно. При цьому перший варіант є більш безпечним, і за відсутності вагомих причин рекомендується використовувати саме його. Схематично алгоритм зображено на рис. 2.2.

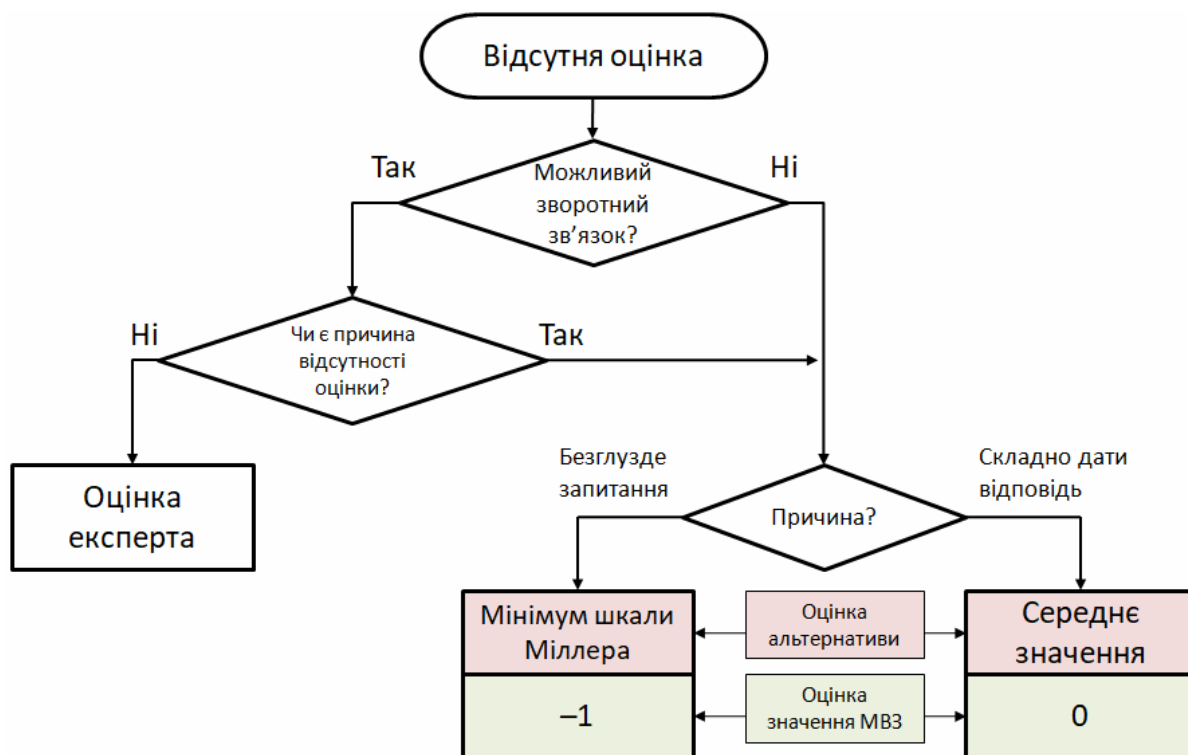


Рисунок 2.2 – Алгоритм заповнення пропусків в оціночній інформації МММА

2.2.2 Забезпечення повноти параметра за рахунок доповнюючої альтернативи

Згідно з припущеннями, які лежать в основі МММА, множина альтернатив кожного параметра має бути повною, тобто при реалізації об'єкта обов'язковим є вибір хоча б однієї з альтернатив цієї множини. Однак в реальності для деяких задач визначення всіх можливих альтернатив є вкрай трудомісткою або взагалі неможливою задачею. В таких випадках додається до альтернатив параметра

додається допоміжна альтернатива «Інше», яка покриває всі невраховані альтернативи.

Коректна оцінка цієї альтернативи є нетривіальною процедурою, тісно пов'язаною із визначенням повноти інформації щодо параметра об'єкту.

Спочатку розглянемо прості прийоми оцінювання допоміжної альтернативи «Інше».

Нехай параметр F_i має n_i альтернатив $a_j^{(i)}$, $j \in [1, n_i]$. Альтернативи оцінені експертами за шкалою Міллера, і отримали вхідні ненормовані оцінки $p_j^{n(i)}$. Через неповноту множини альтернатив додана альтернатива «Інше», позначена $a_{other}^{(i)}$.

Рівна частка. Прийом ґрунтується на тому, що альтернатива «Інше» повинна отримати таку ж вагу, яку б отримала будь-яка інша альтернатива при відсутності інформації про неї. При використанні відносних оцінок (п. 2.6) така альтернатива отримала б оцінку «1». Розглянемо оцінювання вхідних ймовірностей альтернатив параметра при звичайній процедурі МММА.

Альтернативи $a_j^{(i)}$, $j \in [1, n_i]$ отримують нормовану вхідну ймовірність згідно з відношенням:

$$p_j^{(i)} = \frac{n_i}{n_i + 1} \frac{p_j^{n(i)}}{\sum_{k=1}^{n_i} p_k^{n(i)}},$$

а допоміжна альтернатива «Інше» отримує нормовану вхідну ймовірність:

$$p_{other}^{(i)} = \frac{1}{n_i + 1}.$$

При такому підході вважається, що про допоміжну альтернативу взагалі нічого не відомо, оцінки решти альтернатив не беруться до уваги. Зважаючи на це, а також на те, що її ймовірність не пригнічується оцінками матриці взаємозв'язків, які можуть бути від'ємними, альтернатива $a_{other}^{(i)}$ може виявитись не виправдано вагомою.

Мінімальна ймовірність. В цьому підході ненормована ймовірність альтернативи $a_{other}^{(i)}$ встановлюється рівною половині від мінімального значення

шкали, за якою відбувається експертне оцінювання. Підхід ґрунтується на міркуванні, що якби альтернативи, що входять до «Інших», мали б більшу вагу, їх варто було б додати до параметра явно.

Альтернативно, можна встановити ненормовану ймовірність альтернативи $a_{other}^{(i)}$ рівною половині від найменшого значення ймовірності серед інших альтернатив цього параметра:

$$p'_{other}^{(i)} = \frac{\min_j p_j^{(i)}}{2}.$$

Міркування в даному випадку приблизно ті ж: оскільки альтернативи, що входять до складу «Інших», не потрапили до явного списку альтернатив, вони не можуть мати ту ж вагу, що і явні альтернативи.

2.2.3 Оцінювання неповноти вхідних даних модифікованого методу морфологічного аналізу

Зазначимо, що оцінки $p_j^{(i)}$, отримані від експертів, дуже рідко бувають одразу нормованими або близькими до нормованих. Це пояснюється багатьма факторами, зокрема песимізмом або оптимізмом експерта, і в разі оцінки події частотою появи цієї події. Тому ненормовані оцінки ймовірності бувають зміщені в сторону завищення або заниження. Звичайно, оцінки одного параметра не можуть в даному випадку слугувати показником. Але оскільки різні параметри описують один і той самий об'єкт, при цьому ці оцінки робляться одним експертом, зміщення має бути приблизно однаковим. Аномалії в зміщеннях по різних параметрах якраз і можуть пояснюватися неповнотою інформації.

Нехай морфологічна таблиця складається з N параметрів F_i . Для кожного параметра виведемо середню ймовірність альтернатив за оцінками з опитувальної форми:

$$\bar{p}_i'' = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} p_j''^{(i)}}{n_i}. \quad (2.36)$$

Серед параметрів можна виділити дві множини:

1) множина F^* , де набір альтернатив параметра гарантовано описаний повністю – це передусім бінарні і діапазонні параметри, а також ті якісні параметри, де множина альтернатив гарантовано визначена повністю;

2) множина F^{**} параметрів, які допускають можливість введення допоміжної альтернативи «Інше». Очевидно, при визначенні середньої оцінки, яка властива даному експерту для даної задачі, в першу чергу слід керуватися множиною параметрів F_i^* .

Введемо величину очікуваної середньої оцінки для задачі як математичне очікування середньої ненормованої оцінки ймовірності альтернатив параметрів, які відносяться до множини F^* :

$$\bar{p}'' = M(\bar{p}_i''), F_i \in F^*.$$

Величина \bar{p}'' в певній мірі відображає суб'єктивне сприйняття експертом об'єкта дослідження і процесу оцінювання. За ідеальних умов оцінка $\bar{p}'' \approx 0,5$, однак експерт може бути схильним до завищення або заниження оцінок, або на його сприйняття об'єкта дослідження може накладатись загальна частота появи об'єкта дослідження, з довільними характеристиками (наприклад, при дослідженні деякої події експерт вважає, що вона відбувається часто або, навпаки, рідко, і підсвідомо завищує або занижує оцінки всім можливим альтернативам деякого параметра).

Також за оцінками середньої ймовірності альтернатив різних параметрів можна оцінити, наскільки ці оцінки узгоджені між собою. Врахуємо, що оцінки $p_j''^{(i)}$ в (2.36) експерт надає за шкалою Міллера із заданою кількістю рівнів N_S . Можна вважати, що ця оцінка пов'язана з реальною оцінкою альтернативи за

думкою експерта співвідношенням $p_j^{(i)} = p_j^{r(i)} + \xi_j^{(i)}$, де $\xi_j^{(i)}$ – похибка, викликана дискретністю шкали, причому $|\xi_j^{(i)}| \leq \frac{1}{N_s}$. Тоді з (2.36) випливає:

$$\bar{p}_i'' = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (p_j^{r(i)} + \xi_j^{(i)})}{n_i} = \bar{p}_i''' + \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \xi_j^{(i)}}{n_i},$$

де \bar{p}_i''' – реальна середня ненормована оцінка. Різниця між оцінками:

$$|\bar{p}_i'' - \bar{p}_i'''| \leq \frac{\sum_{j=1}^{n_i} |\xi_j^{(i)}|}{n_i} \leq \frac{\sum_{j=1}^{n_i} 1/N_s}{n_i} = \frac{1}{N_s}.$$

Отже, відхилення отриманої середньої оцінки від реальної не повинне перевищувати $\frac{1}{N_s}$. На основі цього міркування можна зробити висновок, що для довіри до значень \bar{p}'' середнє відхилення оцінок $p_j^{(i)}$ для параметрів із множини F^* також не повинне перевищувати $\frac{1}{N_s}$:

$$\frac{\sum_{i, F_i \in F^*} |\bar{p}'' - \bar{p}_i''|}{N^*} \leq \frac{1}{N_s}, \quad (2.37)$$

де N^* – розмір множини F^* .

Невиконання умови (2.37) означає, що суб'єктивна думка експерта щодо різних параметрів відрізняється, і потрібно з'ясувати причини цього явища – це може бути викликаним неточністю формулювань опитувальної форми, неправильним розумінням питань експертом, механічними помилками в заповненні форми тощо.

Розглянемо тепер множину параметрів F^{**} . За формулою (2.36) розрахуємо ненормовану середню ймовірність \bar{p}_k'' деякого параметра $F_k \in F^{**}$. В залежності від співвідношення цієї величини з \bar{p}'' можливі декілька випадків роботи з параметром F_k :

- $\bar{p}_k'' > \bar{p}'' + \frac{1}{N_S}$. Середня оцінка альтернатив параметра F_k сильно перевищує очікувану, що може свідчити про некоректність оцінювання цього параметра, аналогічно до невиконання умови (2.36). Потрібне з'ясування причин цієї невідповідності;
- $\bar{p}'' \leq \bar{p}_k'' \leq \bar{p}'' + \frac{1}{N_S}$. Середня оцінка альтернатив параметра F_k близька до очікуваної, трохи перевищуючи її. Скоріше за все, інформація щодо параметра F_k є достатньо повною, необхідності в альтернативі «Інше» немає;
- $\bar{p}'' - \frac{1}{N_S} \leq \bar{p}_k'' < \bar{p}''$. Середня оцінка альтернатив параметра F_k близька до очікуваної, причому є трохи меншою. Потенційна неповнота інформації може пояснюватись похибкою оцінювання. Рішення про потребу в альтернативі «Інше» приймається в залежності від природи цього параметра;
- $\bar{p}_k'' < \bar{p}'' - \frac{1}{N_S}$. Середня оцінка альтернатив параметра F_k суттєво менше за очікувану. Скоріше за все, інформація щодо параметра F_k є неповною, не всі можливі альтернативи враховані. Рекомендується додавання альтернативи «Інше».

В разі, якщо прийнято рішення про додавання альтернативи «Інше» до набору альтернатив параметра F_k , її ненормовану ймовірність розраховуємо, враховуючи середню ненормовану оцінку ймовірності всіх параметрів і конкретно параметра F_k :

$$p_{other}^{(k)} = n_k (\bar{p}'' - \bar{p}_k'')$$

2.3 Виявлення протиріч у матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів

Структура матриці взаємозв'язків, що використовується в МММА, несе в собі ризик існування протиріч, оскільки взаємозв'язки вказуються попарно для альтернатив кожної пари параметрів окремо. Це означає, що при кількості параметрів $N > 2$ може існувати трійка альтернатив, відношення між якими не узгоджені. Найбільш демонстративним прикладом є ситуація з трьома оцінками матриці взаємозв'язків: $C_{11,21} = 1$, $C_{11,31} = 1$, $C_{21,31} = -1$; тобто вибір альтернативи $a_1^{(1)}$ тягне за собою також вибір до конфігурації альтернатив $a_1^{(2)}$, $a_1^{(3)}$, але при цьому альтернативи $a_1^{(2)}$, $a_1^{(3)}$ є несумісними.

Звичайно, така ситуація є рідкісною для реальних задач, однак для великих морфологічних таблиць із суттєвою кількістю параметрів можуть існувати менші неузгодженості, які важко виявити без спеціальних прийомів.

Розглянемо деяку пару альтернатив $a_{j_1}^{(i_1)}$, $a_{j_2}^{(i_2)}$, для якої виконується $C_{i_1 j_1, i_2 j_2} > 0$. Це означає, що альтернативи мають деякі спільні риси і, відповідно, пред'являють схожі вимоги до інших альтернатив у конфігурації (в разі $C_{i_1 j_1, i_2 j_2} = 1$ ці альтернативи взаємозамінні і пред'являють однакові вимоги до інших альтернатив у конфігурації). Значення $C_{i_1 j_1, i_2 j_2}$ при цьому є мірою цієї схожості альтернатив. Отже, якщо взяти будь-яку третю альтернативу $a_k^{(z)}$, то значення матриці взаємозв'язків $C_{i_1 j_1, zk}$, $C_{i_2 j_2, zk}$ також мають відрізнятися несуттєво. Прийmemo, що відхилення між цими значеннями не повинно перевищувати деякий поріг, який визначається за допомогою $C_{i_1 j_1, i_2 j_2}$:

$$\left| C_{i_1 j_1, zk} - C_{i_2 j_2, zk} \right| \leq 2(1 - C_{i_1 j_1, i_2 j_2}). \quad (2.38)$$

При $C_{i_1 j_1, i_2 j_2} = 1$ відхилення має становити 0, оскільки, як було зазначено вище, обидві альтернативи $a_{j_1}^{(i_1)}$, $a_{j_2}^{(i_2)}$ описують одну й ту саму характеристику об'єкта дослідження. При $C_{i_1 j_1, i_2 j_2} = 0$ альтернативи незалежні, отже різниця між

пов'язаними значеннями матриці взаємозв'язків може бути в будь-яких межах, допустимих для матриці взаємозв'язків взагалі.

Відхилення, що перевищує поріг, заданий формулою (2.38), бажано дослідити окремо, воно може свідчити про протиріччя у експертних оцінках матриці взаємозв'язків для трійки альтернатив $a_{j_1}^{(i_1)}$, $a_{j_2}^{(i_2)}$, $a_k^{(z)}$. Ці оцінки рекомендується переглянути.

Алгоритм виявлення протиріч можна описати так:

- 1) для всіх значень $C_{i_1 j_1, i_2 j_2} > 0$, $i_1 \in [1, N-1]$, $i_2 \in [i_1+1, N]$ виконати кроки 2–3;
- 2) для всіх альтернатив $a_k^{(z)}$, $k \in [1, n_z]$ параметрів F_z , $z \neq i_1$, $z \neq i_2$ провести порівняння значень матриці взаємозв'язків за співвідношенням (2.38);
- 3) якщо співвідношення (2.38) не виконується, переглянути трійку значень $C_{i_1 j_1, i_2 j_2}$, $C_{i_1 j_1, z k}$, $C_{i_2 j_2, z k}$ на предмет існування логічних протиріч.

Зазначимо, що в процедурі розглядаються тільки ті значення матриці взаємозв'язків, для яких $C_{i_1 j_1, i_2 j_2} > 0$, оскільки несумісність альтернатив не свідчить про їх протилежність, і для альтернатив з $C_{i_1 j_1, i_2 j_2} \leq 0$ пов'язані значення матриці взаємозв'язків можуть бути будь-якими без порушення внутрішньої логіки.

2.4 Концепція модифікованого методу морфологічного аналізу для роботи з нечіткими експертними оцінками

2.4.1 Постановка задачі

Об'єкти, що доцільно досліджувати за допомогою МММА, як правило, характеризуються невизначеністю, нечіткістю, неповнотою інформації щодо них. В таких умовах використання точкових оцінок початкової ймовірності альтернатив може бути занадто грубим і не відображати в повній мірі уявлення експерта про об'єкт дослідження. Тому доцільно розробити різновид МММА, який в якості вхідних параметрів використовує нечіткі оцінки вхідних даних.

Сформулюємо постановку задачі для нечіткого МММА:

Дано:

- морфологічна таблиця, що містить множину характеристичних параметрів $F = \{F_i \mid i \in \overline{1, N}\}$, кожний параметр F_i описується множиною альтернатив $A_i = \{a_j^{(i)} \mid j \in \overline{1, n_i}\}$;
- незалежні ймовірності всіх альтернатив, задані функціями приналежності $\{\mu_j^{(i)}(p) \mid i \in \overline{1, N}; j \in \overline{1, n_i}; p \in [0;1]; \mu_j^{(i)}(p) \in [0;1]\}$;
- значення взаємозв'язків всіх пар альтернатив параметрів $\{c_{i_1, i_2, j_1, j_2} \mid i_1, i_2 \in \overline{1, N}; i_1 \neq i_2; j_1 \in \overline{1, n_{i_1}}; j_2 \in \overline{1, n_{i_2}}\}$.

Потрібно:

- з урахуванням взаємозв'язків між параметрами визначити функції приналежності $\{\mu_j^{(i)}(p) \mid i \in \overline{1, N}; j \in \overline{1, n_i}; p \in [0;1]; \mu_j^{(i)}(p) \in [0;1]\}$ для ймовірностей настання кожної з альтернатив $a_j^{(i)}$.

Для розв'язання задачі можна використати декілька різних підходів. Зокрема, метод декомпозиції нечітких чисел, який ліг в основу нечіткого модифікованого методу аналізу ієрархій [154]. В цьому методі використовується зведення нечіткого числа до множини інтервальних оцінок, що відповідають певним рівням міри приналежності, і розв'язання оптимізаційної задачі на кожному з цих рівнів. В такому випадку результат отримуємо як апроксимацію нечіткого числа, якість якої залежить від обраної кількості рівнів.

Такий підхід, хоча й має ряд позитивних сторін, для МММА може бути вкрай неефективним, оскільки спосіб врахування взаємозв'язків між альтернативами параметрів в МММА для великих задач є досить трудомістким, через що оптимізаційна задача стає занадто громіздкою завдяки дуже швидкому росту кількості обмежень при збільшенні кількості альтернатив і параметрів в морфологічній таблиці.

Тому для розв'язання поставленої задачі були розроблені дещо інші підходи, що враховують специфіку процедури МММА.

2.4.2 Розв'язання задачі нечіткого МММА на основі показників сукупної міри приналежності вхідних даних

В розв'язанні задачі, описаної в п. 2.4.1, можна виділити кроки, що співпадають із звичайною процедурою МММА, і розробити нечіткі аналоги відповідних кроків. Основними кроками розв'язання задачі є:

- 1) визначення функцій приналежності для нормованих вхідних ймовірностей альтернатив параметрів;
- 2) визначення функцій приналежності для конфігурацій з використанням нормованих вхідних ймовірностей альтернатив параметрів і матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів;
- 3) визначення функцій приналежності ймовірностей альтернатив на основі функцій належності конфігурацій.

Далі розглядається кожний крок цієї процедури окремо.

2.4.2.1 Визначення функцій приналежності для нормованих вхідних ймовірностей альтернатив параметрів

Функції приналежності вхідних ймовірностей можуть бути отримані різними способами – наприклад, врахування впевненості експерта у оцінці, або використання певної апроксимуючої функції в разі врахування відповідей декількох експертів. Однак незалежно від способу отримання функцій приналежності ці функції для альтернатив одного параметру не будуть пов'язані. Для коректності подальших розрахунків потрібно визначити функції приналежності для ймовірностей альтернатив, які б відповідали умові нормування (в рамках множини ймовірностей кожної з альтернатив параметра).

Введемо поняття сукупної міри приналежності для вектора ймовірностей

$$\text{альтернатив } \vec{p}^{n(i)} = \{p_j^{n(i)}\}, j \in [1, n_i] : M(\vec{p}^{n(i)}) = \prod_{j=1}^n \mu_j^{n(i)}(p_j^{n(i)}).$$

Вектору ймовірностей альтернатив $\vec{p}''^{(i)}$ відповідає вектор нормованих ймовірностей альтернатив $\vec{p}'^{(i)} = \left\{ p_j''^{(i)} / \sum_{j=1}^{n_i} p_j''^{(i)} \right\}, j \in [1, n_i]$.

Для того, щоб визначити міру приналежності деякого конкретного нормованого значення ймовірності $p_j'^{(i)}$, потрібно розглянути множину всіх можливих векторів $\vec{p}''^{(i)}$, які при нормуванні дають для альтернативи $a_j^{(i)}$ значення $p_j'^{(i)}$. Позначимо цю множину

$$P_j'^{(i)}(p_j'^{(i)}) = \left\{ \vec{p}''^{(i)} \mid \frac{p_j''^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} p_j''^{(i)}} = p_j'^{(i)} \right\}. \quad (2.39)$$

Кожному вектору $\vec{p}''^{(i)} \in P_j'^{(i)}(p_j'^{(i)})$ відповідає деяка сукупна міра приналежності $M(\vec{p}''^{(i)})$, отже для визначення функції приналежності нормованої величини ймовірності $\mu_j'^{(i)}(p)$ необхідно певним чином агрегувати ці міри. Для цього можна виділити два основних підходи:

$$1) \text{ інтегральний підхід: } \mu_j'^{(i)}(p) = \int \dots \int_{\vec{p} \in P_j'^{(i)}(p)} M(\vec{p}) d\vec{p};$$

$$2) \text{ екстремальний підхід: } \mu_j'^{(i)}(p) = \max_{\vec{p} \in P_j'^{(i)}(p)} M(\vec{p}).$$

Для ілюстрації розглянемо простий приклад. Нехай параметр має дві альтернативи a_1, a_2 , ймовірність яких описується трикутними функціями приналежності $\mu_1''(p), \mu_2''(p)$:

$$\mu_1''(p) = \begin{cases} \frac{p-0,2}{0,1}, & 0,2 \leq p < 0,3 \\ \frac{0,4-p}{0,1}, & 0,3 \leq p \leq 0,4 \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad \mu_2''(p) = \begin{cases} \frac{p-0,5}{0,15}, & 0,5 \leq p < 0,65 \\ \frac{0,8-p}{0,15}, & 0,65 \leq p \leq 0,8 \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

Графіки функцій приналежності зображено на рис. 2.3.

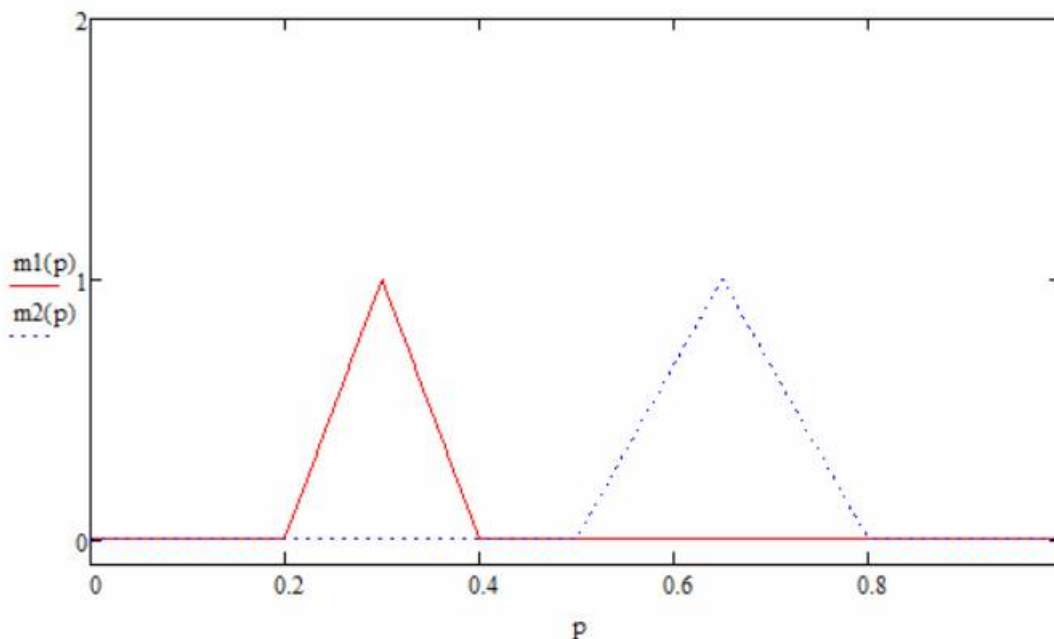


Рисунок 2.3 – Функції приналежності $\mu_1''(p)$, $\mu_2''(p)$

Тривимірний графік сукупної міри приналежності зображено на рис. 2.4.

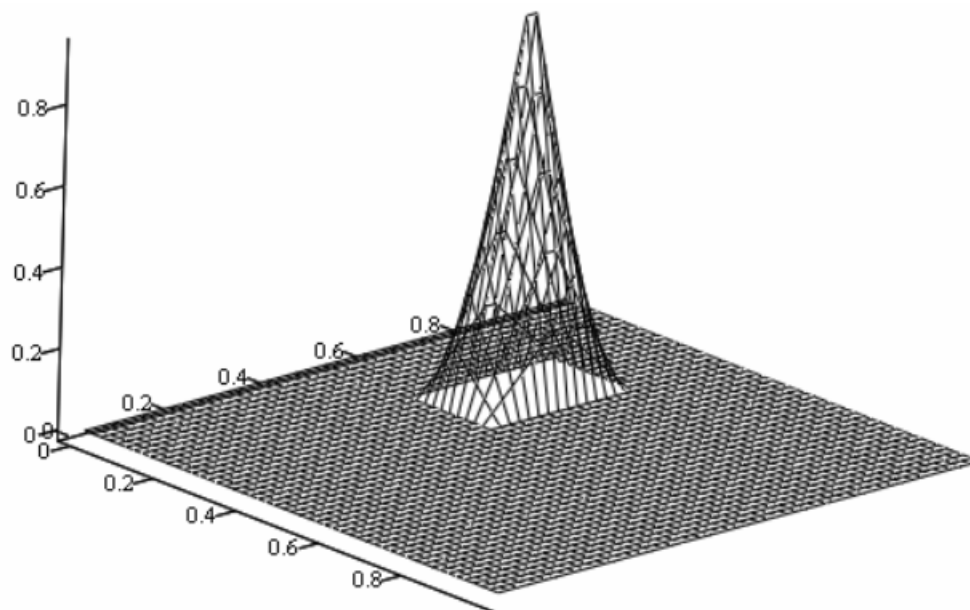


Рисунок 2.4 – Сукупна міра приналежності двох функцій $\mu_1''(p)$, $\mu_2''(p)$

З (2.39) можна записати умову формування множини векторів іншим способом:

$$\frac{p_j^{n(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} p_j^{n(i)}} = p_j^{(i)} \Rightarrow p_j^{n(i)} = k \sum_{z=1, z \neq j}^{n_i} p_z^{n(i)},$$

$$\text{де } k = \frac{p_j^{(i)}}{1 - p_j^{(i)}} \text{ (або } p_j^{(i)} = \frac{k}{k+1}).$$

Для прикладу задачі з двома альтернативами ця умова для ненормованих ймовірностей виглядає як залежність $p_1'' = kp_2''$, де k відповідає деякому нормованому значенню p_1' . Отже, для різних значень p_1' множина можливих векторів лежить вздовж лінії, що проходить через точку $(0; 0)$ на координатній площині рис. 2.4. При інтегральному підході мірою приналежності для деякого значення p_1' буде площа перерізу тривимірної фігури вертикальною площиною вздовж цієї лінії; при екстремальному підході мірою приналежності для деякого значення p_1' буде найвище значення функції на цій лінії.

В подальшому розглядатимемо в загальному вигляді обидва цих підходи, однак зазначимо, що інтегральний підхід є менш зручним, оскільки в більш складних задачах з більшою кількістю параметрів як визначення границь інтегрування, так і саме інтегрування стає досить трудомістким процесом, яке доцільно проводити чисельно.

2.4.2.2 Приклад використання екстремального підходу для визначення функцій належності нормованих оцінок альтернатив при трикутних мірах належності

Задачу, описану в п. 2.4.2.1 можна розв'язати аналітично при використанні екстремального підходу і трикутних функцій ймовірності.

Нехай для простоти розглядається тільки один параметр, що має n альтернатив a_i , $i \in [1, n]$.

Ймовірність кожної альтернативи a_i описується нечіткою функцією приналежності $\mu_i''(p)$, яка має трикутний вигляд. Для простоти вважатимемо, що ці функції симетричні відносно центру, хоча наведені міркування легко узагальнюються для несиметричних функцій:

$$\mu_i''(p) = \begin{cases} 0, & p < l_i \\ \frac{p-l_i}{w_i}, & l_i \leq p < c_i \\ \frac{u_i-p}{w_i}, & c_i \leq p \leq u_i \\ 0, & p > u_i \end{cases} = \begin{cases} 0, & p < l_i \\ \frac{w_i + s_i(p)(c_i - p)}{w_i}, & l_i \leq p \leq u_i \\ 0, & p > u_i \end{cases}$$

де

$$s_i(p) = \begin{cases} -1, & p < c_i \\ 0, & p = c_i \\ 1, & p > c_i \end{cases}$$

Згідно з п. 2.4.2.1, потрібно знайти функцію $\mu_i''(p) = \max_{\vec{p} \in P(p)} M(\vec{p})$, де

$$M(\vec{p}) = \prod_{j=1}^n \mu_j''(p_j), \quad P(p): \frac{p_i}{\sum_{j=1}^n p_j} = p \quad \text{або} \quad P(p): p_i = k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j, \quad k = \frac{p}{1-p}.$$

Можна встановити нижню і верхню межу області $\mu_i(p) > 0$:

$$\sum_{j=1}^n l_j < p < \sum_{j=1}^n u_j,$$

або

$$\frac{l_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n u_j} < k < \frac{u_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n l_j},$$

оскільки за цими межами хоча б одне зі значень $\mu_j''(p) = 0$.

Відокремимо у виразі $M(\vec{p})$ міру належності для альтернативи a_i :

$$M(\vec{p}) = \prod_{j=1}^n \mu_j''(p_j) = \mu_i''\left(k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j\right) \prod_{j=1, j \neq i}^n \mu_j''(p_j). \quad (2.40)$$

Похідна виразу (2.40) за p_d для довільного $d \in [1; n]$:

$$\frac{\partial M(\vec{p})}{\partial p_d} = \prod_{j=1, j \neq i, j \neq d}^n \mu_j''(p_j) \left(\mu_d'(p_d) \frac{d}{dp_d} \mu_i''\left(k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j\right) + \mu_i''\left(k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j\right) \frac{d\mu_d''(p_d)}{dp_d} \right),$$

або

$$\frac{\partial M(\vec{p})}{\partial p_d} = \prod_{j=1, j \neq i, j \neq d}^n \mu_j''(p_j) \left(-\frac{ks_i(p_i)}{w_i} \mu_d''(p_d) - \frac{s_d(p_d)}{w_d} \mu_i''(p_i) \right).$$

Деяка точка \vec{p}^* буде особливою, якщо:

1) знак $s_i(p_i)$ протилежний до знаку $s_d(p_d)$ для довільного $d \in [1, n]; d \neq i$;

2) $\mu_d''(p_d) = \frac{b}{w_d}$ при $d \in [1, n]; d \neq i$, і при цьому $\mu_i''\left(k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j\right) = \frac{kb}{w_i}$, де b –

деякий коефіцієнт, пов'язаний з k .

Це досягається в точці

$$p_j^* = \begin{cases} L_j(p_j) - s_j(p_j)kb, & j = i \\ L_j(p_j) - s_j(p_j)b, & j \neq i \end{cases}$$

де L_j – ближча межа функції $\mu_j''(p_j)$: $L_j(p_j) = c_j + s_j(p_j)w_j$.

Покажемо це:

$$\begin{aligned} \mu_j''(L_j(p_j) - s_j(p_j)b) &= \frac{w_j + s_j(p_j)(c_j - (c_j + s_j(p_j)w_j) - s_j(p_j)b)}{w_j} = \\ &= \frac{w_j + s_j(p_j)(c_j - (c_j + s_j(p_j)w_j) - s_j(p_j)b)}{w_j} = \frac{b}{w_j}. \end{aligned}$$

Знайдемо k , яке відповідає заданому b :

$$bs_i(p_i)k = L_i(p_i) - p_i.$$

Враховуючи, що $p_i = k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j$, отримуємо:

$$bs_i(p_i)k = L_i(p_i) - k \sum_{j=1, j \neq i}^n (L_j(p_j) - s_j(p_j)b).$$

Звідси

$$k = \frac{L_i(p_i)}{\sum_{j=1, j \neq i}^n L_j(p_j) + s_i(p_i)b - \sum_{j=1, j \neq i}^n s_j(p_j)b}. \quad (2.41)$$

Враховуючи вимогу до протилежності знаків, вираз (2.41) спрощується до

$$k = \frac{u_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n l_j + nb} \quad \text{або} \quad k = \frac{l_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n u_j - nb} \quad \text{в залежності від знака } s_i(p_i).$$

Для простоти в подальшому розглядаємо $s_i(p_i) \leq 0$, $s_j(p_j) > 0$, $j = \overline{1, n}$, $j \neq i$

Похідні $\frac{\partial M(\vec{p})}{\partial p_d}$ є неперервними, поки $b < \min\left(\min_j(w_j), \frac{w_i}{k}\right)$.

Нехай $b = \min_j w_j$, при $j = j_{\min} \neq i$, відповідно $k = k_{j_{\min}}$, $p_{j_{\min}} = c_{j_{\min}}$. Тоді $\mu''_{j_{\min}}(c_{j_{\min}}) = 1$, тобто ріст функції приналежності однієї з ймовірностей $p_{j_{\min}}$ досяг максимуму. Для інших змінних $p_i > c_i$, $p_j < c_j$, $j \neq j_{\min}$ – робимо припущення, що нерівності строгі, однак міркування узагальнюються і на випадок, коли одночасно два значення p_i досягають своїх максимумів. Враховуючи $\mu''_{j_{\min}}(c_{j_{\min}}) = 1$, вираз (2.40) набуває вигляду:

$$M_{j_{\min}}(\vec{p}) = \mu'_i\left(k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j\right) \prod_{j=1, j \neq i, j \neq j_{\min}}^n \mu'_j(p_j),$$

тобто функція для альтернативи $a_{j_{\min}}$ зникає, і задача зводиться до попередньої із

$$\text{урахуванням, що } p_i = k \left(c_{j_{\min}} + \sum_{j=1, j \neq i, j \neq j_{\min}}^n p_j \right).$$

В області $k > k_{j_{\min}}$ розв'язок цієї задачі є мінімумом. Для $p_{j_{\min}} = c_{j_{\min}}$ значення функції менші. Покажемо, що при $s_i(p_i) = s_d(p_d)$ виконується нерівність

$$M([p_1 \quad \dots \quad p_d \quad \dots \quad p_n]^T) < M([p_1 \quad \dots \quad c_d \quad \dots \quad p_n]^T).$$

Скоротимо обидві частини нерівності на $\prod_{j=1, j \neq i, j \neq d}^n \mu'_j(p_j)$:

$$\mu''_i\left(k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j\right) \mu''_j(p_j) < \mu''_i\left(k \left(c_d + \sum_{j=1, j \neq i, j \neq d}^n p_j \right)\right).$$

Зазначимо, що оскільки $s_i(p_i) = s_d(p_d)$, то $\frac{k s_i(p_i)(p_d - c_d)}{w_i} > 0$, і відповідно

$$\begin{aligned} \mu_i'' \left(k \left(c_d + \sum_{j=1, j \neq i, j \neq d}^n p_j \right) \right) &= \frac{w_i + s_i(p_i) \left(c_i - k \left(c_d + \sum_{j=1, j \neq i, j \neq d}^n p_j \right) \right)}{w_i} > \\ &> \frac{w_i + s_i(p_i) \left(c_i - k \left(c_d + \sum_{j=1, j \neq i, j \neq d}^n p_j \right) \right)}{w_i} - \frac{ks_i(p_i)(p_d - c_d)}{w_i} = \mu_i'' \left(k \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j \right). \end{aligned}$$

Враховуючи попередню нерівність і те, що $\mu_i''(p_j) \leq 1$, нерівність доведено.

На основі вищезазначених міркувань створимо алгоритм визначення лівої частини функції приналежності $\mu_i'(p)$ для альтернативи a_i .

1. Знаходимо нижню межу для k : $k_0 = \frac{l_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n u_j}$.

2. Встановлюємо $r = 1$.

3. Формуємо множину вільних індексів D як множину всіх можливих індексів альтернатив параметра.

4. Визначаємо m_D – кількість елементів множини D .

5. Знаходимо $\underline{b}_r = \min \left(\min_{j \in D, j \neq i} (w_j), \frac{w_i}{k'} \right)$, якщо $i \in D$, або $\underline{b}_r = \min_{j \in D} (w_j)$, якщо

$i \notin D$; тут $k' = \frac{c_i}{\sum_{j \in D, j \neq i} l_j + \sum_{j \notin D, j \neq i} c_j + (m_D - 1)w_i}$. Відмічаємо, для якого індексу

(множини індексів) \underline{d}_r досягається мінімум.

6. Обчислюємо $\underline{k}_r = \frac{l_i}{\sum_{j \in D, j \neq i} u_j + \sum_{j \notin D, j \neq i} c_j - m_D \underline{b}_r}$, якщо $i \notin \underline{d}_r \wedge i \in D$;

$\underline{k}_r = \frac{c_i}{\sum_{j \in D, j \neq i} u_j + \sum_{j \notin D, j \neq i} c_j - m_D \underline{b}_r}$ якщо $i \notin \underline{d}_r \wedge i \notin D$, або $\underline{k}_r = \frac{l_i + m_D w_i}{\sum_{j \in D, j \neq i} u_j + \sum_{j \notin D, j \neq i} c_j}$, якщо

$i \in \underline{d}_r$.

7. Функція на проміжку $[k_{r-1}; k_r]$: $M(k) = \frac{kb^{m_D}}{\prod_{j \in D} w_j}$, якщо $i \in D$, $M(k) = \frac{b^{m_D}}{\prod_{j \in D} w_j}$,

якщо $i \notin D$. Вираз для $b(k)$ записуємо як $b(k) = \frac{\sum_{j \in D, j \neq i} u_j + \sum_{j \in D, j \neq i} c_j - \frac{l_i}{k}}{m_D}$, якщо $i \in D$, і

$$b(k) = \frac{\sum_{j \in D, j \neq i} u_j + \sum_{j \in D, j \neq i} c_j - \frac{c_i}{k}}{m_D}, \text{ якщо } i \notin D.$$

8. Виключаємо з множини D індекс (множину індексів) \underline{d}_r .

9. Якщо множина D не порожня, $r := r + m_D$, повертаємось до кроку 4.

Алгоритм визначення правої частини функції приналежності $\mu'_i(p)$ для альтернативи a_i є схожим.

1. Знаходимо верхню межу для k : $k_0 = \frac{l_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n u_j}$.

2. Встановлюємо $r = 2n$.

3. Формуємо множину вільних індексів D як множину всіх можливих індексів альтернатив параметра.

4. Визначаємо m_D – кількість елементів множини D .

5. Знаходимо $\bar{b}_r = \max\left(\max_{j \in D, j \neq i} (w_j), \frac{w_i}{k'}\right)$, якщо $i \in D$, або $\bar{b}_r = \max_{j \in D} (w_j)$, якщо

$i \notin D$; тут $k' = \frac{c_i}{\sum_{j \in D, j \neq i} u_j + \sum_{j \in D, j \neq i} c_j + (m_D - 1)w_i}$. Відмічаємо, для якого індексу

(множини індексів) \bar{d}_r досягається максимум.

6. Обчислюємо $\bar{k}_r = \frac{u_i}{\sum_{j \in D, j \neq i} l_j + \sum_{j \in D, j \neq i} c_j - m_D \bar{b}_r}$, якщо $i \notin \bar{d}_r \wedge i \in D$;

$\bar{k}_r = \frac{c_i}{\sum_{j \in D, j \neq i} l_j + \sum_{j \in D, j \neq i} c_j - m_D \bar{b}_r}$ якщо $i \notin \bar{d}_r \wedge i \notin D$, або $\bar{k}_r = \frac{u_i + m_D w_i}{\sum_{j \in D, j \neq i} l_j + \sum_{j \in D, j \neq i} c_j}$, якщо $i \in \bar{d}_r$.

7. Функція на проміжку $[k_{r-1}; k_r]$: $M(k) = \frac{kb^{m_D}}{\prod_{j \in D} w_j}$, якщо $i \in D$, $M(k) = \frac{b^{m_D}}{\prod_{j \in D} w_j}$,

якщо $i \notin D$. Вираз для $b(k)$ запишемо як $b(k) = \frac{\sum_{j \in D, j \neq i} l_j + \sum_{j \in D, j \neq i} c_j - \frac{u_i}{k}}{m_D}$, якщо $i \in D$, і

$b(k) = \frac{\sum_{j \in D, j \neq i} l_j + \sum_{j \in D, j \neq i} c_j - \frac{c_i}{k}}{m_D}$, якщо $i \notin D$.

8. Виключаємо з множини D індекс (множину індексів) \bar{d}_r .

9. Якщо множина D не порожня, $r := r - m_D$, повертаємось до кроку 4.

Розглянемо приклад побудови функції приналежності для параметра з двох альтернатив a_1, a_2 , що мають такі функції приналежності:

$$\mu_1''(p) = \begin{cases} 0, & p < 0,3 \\ \frac{p-0,3}{0,1}, & 0,3 \leq p < 0,4 \\ \frac{0,5-p}{0,1}, & 0,4 \leq p \leq 0,5 \\ 0, & p > 0,5 \end{cases} \quad \mu_2''(p) = \begin{cases} 0, & p < 0,3 \\ \frac{p-0,3}{0,2}, & 0,3 \leq p < 0,5 \\ \frac{0,7-p}{0,2}, & 0,5 \leq p \leq 0,7 \\ 0, & p > 0,7 \end{cases}$$

Графіки цих функцій зображено на рис. 2.5:

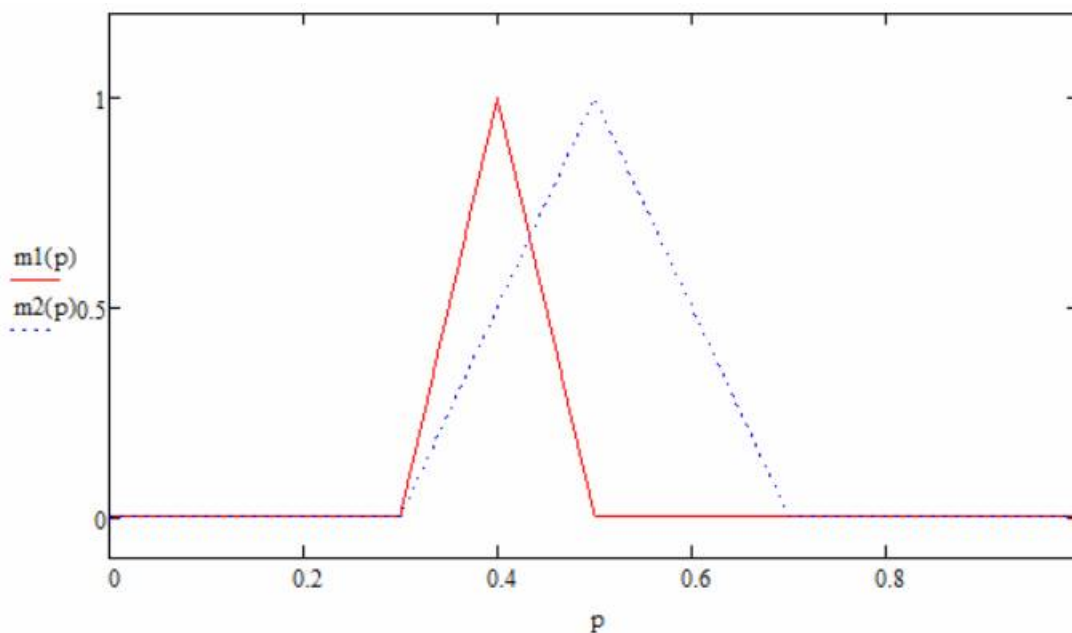


Рисунок 2.5 – Функції приналежності $\mu_1''(p)$, $\mu_2''(p)$ ненормованих ймовірностей

Знайдемо межі проміжків для побудови результуючих функцій. Для μ_1' :

$$\underline{k}_0 = 0,429, \text{ або } \underline{p}_0 = 0,3;$$

$$\underline{k}_1 = 0,714, \text{ або } \underline{p}_1 = 0,417;$$

$$\underline{k}_2 = \overline{k}_2 = 0,8, \text{ або } \underline{p}_2 = \overline{p}_2 = 0,444;$$

$$\overline{k}_3 = 1, \text{ або } \overline{p}_3 = 0,5;$$

$$\overline{k}_4 = 1,667, \text{ або } \overline{p}_4 = 0,625.$$

Функція $\mu_1'(k)$ має вигляд:

$$\mu_1'(k) = \begin{cases} \frac{k}{0,1 \cdot 0,2} \frac{(0,7 - 0,3/k)^2}{4}, & 0,429 \leq k \leq 0,714 \\ \frac{(0,7 - 0,4/k)}{0,2}, & 0,714 < k \leq 0,8 \\ \frac{(0,4/k - 0,3)}{0,2}, & 0,8 < k \leq 1 \\ \frac{k}{0,1 \cdot 0,2} \frac{(0,5/k - 0,3)^2}{4}, & 1 < k \leq 1,667 \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

Для функції μ'_2 отримуємо межі проміжків:

$$\underline{k}_0 = 0,6, \text{ або } \underline{p}_0 = 0,375;$$

$$\underline{k}_1 = 1, \text{ або } \underline{p}_1 = 0,5;$$

$$\underline{k}_2 = \overline{k}_2 = 1,25, \text{ або } \underline{p}_2 = \overline{p}_2 = 0,556;$$

$$\overline{k}_3 = 1,4, \text{ або } \overline{p}_3 = 0,583;$$

$$\overline{k}_4 = 2,333, \text{ або } \overline{p}_4 = 0,7.$$

Функція $\mu'_2(k)$ має вигляд:

$$\mu'_2(k) = \begin{cases} \frac{k}{0,1 \cdot 0,2} \frac{(0,5 - 0,3/k)^2}{4}, & 0,6 \leq k \leq 1 \\ \frac{k(0,4 - 0,3/k)}{0,2}, & 1 < k \leq 1,25 \\ \frac{k(0,7/k - 0,4)}{0,2}, & 1,25 < k \leq 1,4 \\ \frac{k}{0,1 \cdot 0,2} \frac{(0,7/k - 0,3)^2}{4}, & 1,4 < k \leq 2,333 \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

Для переходу від коефіцієнту k до ймовірностей використовуємо підстановку $k = \frac{p}{1-p}$. Тоді вигляд функцій приналежності для ймовірностей буде

виглядати, як показано на рис. 2.6.

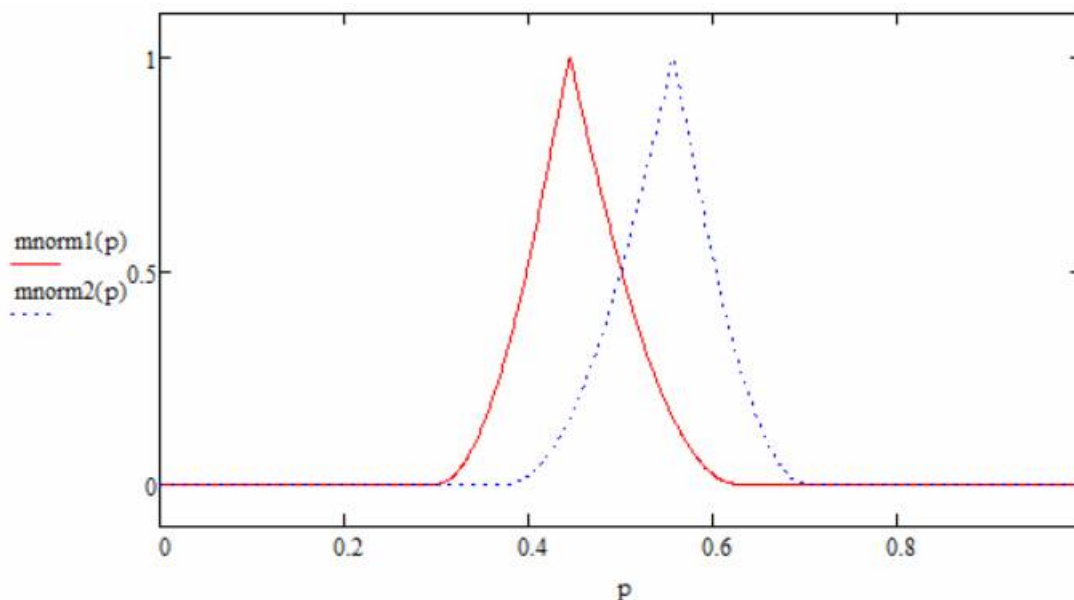


Рисунок 2.6 – Функції приналежності $\mu'_1(p)$, $\mu'_2(p)$ нормованих ймовірностей

З рис. 2.6 видно, що функції симетричні відносно 0,5. Це очікуваний результат, оскільки сукупна міра належності для p_1 і $(1 - p_2)$ співпадатиме при $p_1 + p_2 = 1$. Також закономірністю є піки функцій в точках 0,444 і 0,556, що є нормованими значеннями початкових ймовірностей 0,4 і 0,5 відповідно.

2.4.2.3 Визначення функцій приналежності для конфігурацій з використанням нормованих вхідних ймовірностей альтернатив параметрів і матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів

В звичайній процедурі МММА ненормована ймовірність конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$ визначається наступним чином:

$$P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = C_{j_1 j_2 \dots j_N} p'_{j_1}{}^{(i_1)} \dots p'_{j_N}{}^{(i_N)}, \quad (2.42)$$

де $C_{j_1 j_2 \dots j_N} = \prod_{m=1}^{N-1} \prod_{l=m+1}^N (c_{m j_m, j_l} + 1)$ – агрегований вплив значень матриці взаємозв'язків для цієї конфігурації.

В нечіткій процедурі значення $p'_{j_1}{}^{(i_1)}, \dots, p'_{j_N}{}^{(i_N)}$ задаються функціями приналежності $\mu'_{j_i}{}^{(i)}(p)$, і ймовірності альтернатив можуть набувати значень ймовірності у деякому діапазоні. Так само, як і в п. 2.4.2.1, введемо показник

сукупної міри належності для конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$ і відповідного набору ймовірностей $\{p'_{j_1}, p'_{j_2}, \dots, p'_{j_N}\}$. Вектор значень цих ймовірностей позначатимемо як $\vec{p}_{j_1 \dots j_N}$. Тоді сукупна міра належності при векторі $\vec{p}_{j_1 \dots j_N}$ складає:

$$M(\vec{p}_{j_1 \dots j_N}) = \prod_{i=1}^N \mu_{j_i}^{(i)}(p'_{j_i}).$$

Для нечіткої процедури міру $\mu_{j_1 \dots j_N}(p)$ того, що ймовірність конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$ набуде значення p , обчислюємо на основі сукупної міри належності. Спочатку розглянемо окремий випадок, коли всі параметри є незалежними, тобто всі значення матриці взаємозв'язків $C_{i_1 j_1 i_2 j_2} = 0$ при $i_1 \in [1, N]$, $i_2 \in [1, N]$.

Серед множини можливих векторів ймовірностей альтернатив $\vec{p}_{j_1 \dots j_N}$ виділимо множину тих, де для деякого значення p виконується умова $p'_{j_1} p'_{j_2} \dots p'_{j_N} = p$. Цю множину позначимо $P_{j_1 \dots j_N}(p)$:

$$P_{j_1 \dots j_N}(p) = \left\{ \vec{p}_{j_1 \dots j_N} \mid p'_{j_1} p'_{j_2} \dots p'_{j_N} = p \right\}.$$

Тоді так само, як і в попередньому пункті, можна застосувати інтегральний і екстремальний підходи:

$$1) \text{ інтегральний підхід: } \mu_{j_1 \dots j_N}(p) = \int \dots \int_{\vec{p}_{j_1 \dots j_N} \in P_{j_1 \dots j_N}(p)} M(\vec{p}_{j_1 \dots j_N}) d\vec{p}_{j_1 \dots j_N};$$

$$2) \text{ екстремальний підхід: } \mu_{j_1 \dots j_N}(p) = \max_{\vec{p}_{j_1 \dots j_N} \in P_{j_1 \dots j_N}(p)} M(\vec{p}_{j_1 \dots j_N}).$$

Використовуючи ці залежності, узагальнимо їх на випадок наявності залежності між параметрами. Тоді, враховуючи (2.42), множина $P_{j_1 \dots j_N}(p)$ набуває вигляду:

$$P_{j_1 \dots j_N}(p) = \left\{ \vec{p}_{j_1 \dots j_N} \mid C'_{j_1 j_2 \dots j_N} p'_{j_1} p'_{j_2} \dots p'_{j_N} = p \right\},$$

або

$$P_{j_1 \dots j_N}(p) = \left\{ \bar{p}_{j_1 \dots j_N} \mid p_{j_1}^{(1)} p_{j_2}^{(2)} \dots p_{j_N}^{(N)} = \frac{p}{C'_{j_1 j_2 \dots j_N}} \right\}, \quad (2.43)$$

де $C'_{j_1 j_2 \dots j_N} = \frac{C_{j_1 j_2 \dots j_N}}{\sum_{k_s, s \in [1, N]} C_{k_1, \dots, k_N}}$ – нормуючий множник для агрегованого показника

матриці взаємозв'язків для конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$.

З (2.43) слідує, що для визначення функцій належності можна скористатись попередніми співвідношеннями, замінюючи аргумент, наприклад при екстремальному підході $\mu_{j_1 \dots j_N}(C'_{j_1 j_2 \dots j_N} p) = \max_{\bar{p}_{j_1 \dots j_N} \in P_{j_1 \dots j_N}(p)} M(\bar{p}_{j_1 \dots j_N})$, тобто функція стискається або розтягується по горизонтальній осі в залежності від значення $C'_{j_1 j_2 \dots j_N}$.

2.4.2.4 Визначення функцій приналежності ймовірностей альтернатив на основі функцій належності конфігурацій

При використанні чіткої процедури МММА ймовірність деякої альтернативи $a_j^{(i)}$ параметра F_i отримуємо, як суму ймовірностей всіх конфігурацій, до якої входить ця альтернатива:

$$p_j^{(i)} = \sum_{k_s, s \in [1, N], s \neq i} P(\{a_{k_1}^{(1)}, \dots, a_j^{(i)}, \dots, a_{k_N}^{(N)}\}).$$

Нечітку процедуру будуємо за тими ж принципами, що і для попередніх кроків. Вводимо показник сукупної міри належності для деякої множини конфігурацій Ω і заданих ймовірностей конфігурацій $p_{j_1 \dots j_N}^C$, що входять до цієї множини:

$$M(\Omega) = \prod_{a_{j_1 \dots j_N} \in \Omega} \mu_{j_1 \dots j_N}(p_{j_1 \dots j_N}^C),$$

де $a_{j_1 \dots j_N} = \{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$ – скорочений запис для конфігурації.

Альтернативі $a_j^{(i)}$ відповідає множина конфігурацій $\Omega_j^{(i)}$:

$$\Omega_j^{(i)} = \{a_{k_1 \dots k_N} \mid k_l \in [1, n_l], l \in [1, N], l \neq i, k_i = j\}.$$

Міру належності $\mu_j^{(i)}(p)$ знаходимо на основі сукупних мір належності для множини $\Omega_j^{(i)}$ за умови, що сума ймовірностей всіх конфігурацій з множини $\Omega_j^{(i)}$ складає p . Позначимо набір ймовірностей конфігурацій, що відповідає цій умові через $P_{\Omega_j^{(i)}}(p)$:

$$P_{\Omega_j^{(i)}}(p) = \left\{ \left\{ p_{j_1 \dots j_N}^C \right\}_{a_{j_1 \dots j_N} \in \Omega_j^{(i)}} \mid \sum p_{j_1 \dots j_N}^C = p \right\}.$$

На цьому етапі також можливі два підходи:

- 1) інтегральний підхід: $\mu_j^{(i)}(p) = \int \dots \int_{\left\{ p_{j_1 \dots j_N}^C \right\}_{a_{j_1 \dots j_N} \in \Omega_j^{(i)}} \in P_{\Omega_j^{(i)}}(p)} M(\Omega_j^{(i)}) dp_{j_1 \dots j_N}^C$;
- 2) екстремальний підхід: $\mu_j^{(i)}(p) = \max_{\left\{ p_{j_1 \dots j_N}^C \right\}_{a_{j_1 \dots j_N} \in \Omega_j^{(i)}} \in P_{\Omega_j^{(i)}}(p)} M(\Omega_j^{(i)})$.

В результаті цих процедур отримуємо набір функцій приналежності $\mu_j^{(i)}(p)$, $i \in [1, N]$, $j \in [1, n_i]$ ймовірностей альтернатив $a_j^{(i)}$ з урахуванням взаємозв'язків між параметрами, заданих матрицею взаємозв'язків. Нечіткість оцінок допомагатиме як взяти до уваги нечіткість вхідних даних, так і оцінити впевненість у отриманих результатах для прийняття рішення, що в разі точкових оцінок є неможливим.

2.5 Оцінювання упередженості моделі в модифікованому методі морфологічного аналізу

Питання потенційної недостовірності вхідних даних є складним для будь-якого методу системного аналізу. Основною його особливістю є те, що неможливо зробити висновок про недостовірність даних, керуючись тільки цими даними. Іншими словами, будь-який висновок, виведений із певного набору даних, буде здаватись достовірним, якщо розглядати його тільки в межах цього набору даних.

Тому метою розроблення прийому оцінювання упередженості було намагання створити процедуру, яка дозволить експертові проаналізувати роботу моделі в цілому і виявити можливі неспівпадіння з реальним світом, які можуть призвести до більш детального перегляду аналітиком наборів оцінок, які призводять до неадекватних результатів.

Ідея оцінювання упередженості полягає в поданні на вхід моделі МММА (тобто морфологічної таблиці з заповненою МВЗАП) об'єкта, про який абсолютно нічого не відомо. В результаті врахування взаємозв'язків вхідні оцінки будуть змінені, і величина цих змін (упередженість моделі, тобто наскільки модель збільшує або зменшує оцінки об'єкту, про який немає інформації) є підставою для розгляду. Якщо модель на основі МММА передбачається використовувати неодноразово, для оцінки різних об'єктів і ситуацій, пов'язаних з ними, є сенс провести аналіз упередженості і в разі необхідності здійснити відповідні корекції.

Оцінювання упередженості моделі є результатом проведення МММА на тривіальних вхідних даних $p_j^{(i)} = 1/n_i$. Тобто упереджену оцінку ймовірності альтернативи $a_j^{(i)}$ розраховуємо таким чином

$$\tilde{p}_j^{(i)} = \frac{\sum_{k_s, s \neq i} C_{k_1, \dots, j, \dots, k_N}}{\sum_{k_s} C_{k_1, \dots, k_N}},$$

де C_{k_1, \dots, k_N} розраховуємо так само, як і в п. 2.1.7.

Оцінки $\tilde{p}_j^{(i)}$ можна подати на вхід другого етапу двоетапного МММА, щоб дослідити упередженість моделі щодо рішення.

Упередженість моделі показує результат оцінювання МММА, якщо взагалі немає вхідних даних щодо об'єкта дослідження. Потрібно зазначити, що ці оцінки не обов'язково мають бути близькими до середніх (наприклад, для більшості ділянок міста підземне будівництво буде скоріше доцільним, ніж недоцільним). При правильній побудові моделі вона має показувати середню ситуацію щодо об'єктів дослідження; наприклад, для потенційних ділянок будівництва підземних об'єктів це будуть середні показники для цих ділянок на першому етапі МММА і

очікувані параметри рішення щодо ділянок на другому етапі. Експерт може оцінити отримані значення щодо їх відповідності реальному світу.

Упередженість моделі також корисна з точки зору аналізу результатів: порівняння результатів для конкретної задачі з упередженістю моделі дає змогу зрозуміти, наскільки отримані значення є типовими або нетиповими, в яку сторону від середнього значення вони відрізняються.

2.6 Процедура модифікованого методу морфологічного аналізу з відносними оцінками

Розглянемо ще один прийом, який полегшує роботу з вхідними даними в МММА. Оскільки оцінки альтернатив є оцінками ймовірностей, для них справедливе відношення (2.44):

$$\sum_{j=1}^{n_i} p_j^{(i)} = 1, i \in [1, N]. \quad (2.44)$$

Такий опис оцінок є найбільш природним, однак у випадку задач із великою кількістю альтернатив у параметрів він стає малоінформативним. Розглянемо для прикладу задачу сценарного аналізу затримок і простоїв в транспортній системі великого підприємства [159], яка була раніше досліджена за допомогою МММА. Наведемо одразу таблицю результатів розрахунку (табл. 2.5).

Бачимо, що для параметрів F_1 , F_3 через велику кількість альтернатив порівняння оцінок є ускладненим. Крім того, значення самі по собі не є достатніми – наприклад, значення $p_2^{(1)} = 0,136$ є важливим значенням, оскільки ця альтернатива має вагу більше середньої, в той час як близьке значення $p_3^{(2)} = 0,155$, навпаки, означає низьку ймовірність цієї альтернативи порівняно з іншими альтернативами цього параметра.

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку для задачі сценарного аналізу затримок і простоїв в транспортній системі великого підприємства

1. Стадія		2. Тривалість		3. Причина	
1.1. Комерційний огляд	0,102	2.1. До 1 години	0,408	3.1. Неправильно оформлені документи	0,069
1.2. Технічний огляд	0,136	2.2. 1–3 години	0,326	3.2. Неякісний вантаж	0,169
1.3. Обробка документів	0,082	2.3. Від 3 годин до доби	0,155	3.3. Нестача місця на коліях	0,115
1.4. Контроль якості	0,081	2.4. Більше доби	0,111	3.4. Незадовільний технічний стан	0,098
1.5. Зважування	0,094			3.5. Нестача змінного персоналу	0,246
1.6. Розформування/ сортування	0,127			3.6. Нестача рухомого складу	0,107
1.7. Розвантаження	0,234			3.7. Брак в роботі	0,055
1.8. Екіпірування	0,043			3.8. Зношення колій/ Обмеження швидкості	0,141
1.9. Завантаження	0,101				

Ще більш явно цей ефект спостерігається, якщо розглядати ймовірності конфігурацій. Для більшості задач, що досліджуються МММА, такий розгляд немає сенсу робити, оскільки отримані ймовірності дуже малі і не несуть корисної інформації. Для ілюстрації розглянемо для задачі з табл. 2.5 фрагмент таблиці конфігурацій (табл. 2.6).

У випадку більших морфологічних таблиць кількість конфігурацій швидко росте, тому значення ймовірностей окремих конфігурацій можуть набувати дуже малих величин, так що їх обрахунок і подальше зведення у ймовірності альтернатив параметрів може накопичувати похибки.

Для подолання вказаних недоліків пропонується використовувати замість нормованої відносну оцінку ймовірності $\tilde{p}_j^{(i)}$, масштабовану з урахуванням кількості альтернатив n_i кожного параметра $F_i, i \in [1, N]$. Тоді співвідношення (2.44) набуде вигляду (2.45):

$$\sum_{j=1}^{n_i} \tilde{p}_j^{(i)} = n_i, i \in [1, N] \quad (2.45)$$

Таблиця 2.6 – Таблиця розрахованих ймовірностей конфігурацій для морфологічної таблиці 2.5 (неможливі конфігурації пропущено)

Конфігурація	Опис	Ймовірність
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_1^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Неправильно оформлені документи	0,00597
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_2^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Неякісний вантаж	0,01066
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_3^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Нестача місця на коліях	0,00778
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_5^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Нестача змінного персоналу	0,01298
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_6^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Нестача рухомого складу	0,00634
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_1^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Неправильно оформлені документи	0,00447
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_2^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Неякісний вантаж	0,00894
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_3^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Нестача місця на коліях	0,00571
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_5^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Нестача змінного персоналу	0,00981
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_6^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Нестача рухомого складу	0,00476
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_1^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Неправильно оформлені документи	0,00182
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_2^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Неякісний вантаж	0,00426
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_3^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Нестача місця на коліях	0,00226
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_5^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Нестача змінного персоналу	0,00362
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_6^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Нестача рухомого складу	0,00205
...

Між $p_j^{(i)}$ і $\tilde{p}_j^{(i)}$ легко встановити відповідність для переходу від однієї оцінки до іншої: $\tilde{p}_j^{(i)} = n_i p_j^{(i)}$.

Відповідно, вираз для розрахунку попередньої оцінки ймовірності із корпусу текстових фрагментів набуде вигляду:

$$\tilde{p}_j^{(i)} = \frac{n_i \sum_{k=1}^{N_{text}} R_j^{(i)}(g_k)}{\sum_{k=1}^{N_{text}} \sum_{j^*=1}^{n_i} R_{j^*}^{(i)}(g_k)}.$$

Можна показати, що спосіб обчислення остаточних відносних оцінок альтернатив параметрів з урахуванням матриці взаємозв'язків практично не відрізняється від стандартної процедури [157]:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{j_k}^{(i_k)} = n_{i_k} p_{j_k}^{(i_k)} &= \frac{n_{i_k} p_{j_k}^{(i_k)} \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{k-1}=1}^{n_{k-1}} \sum_{j_{k+1}=1}^{n_{k+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N} p_{j_1}^{(i_1)} \dots p_{j_N}^{(i_N)}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N} p_{j_1}^{(i_1)} \dots p_{j_N}^{(i_N)}} = \\ &= \frac{n_{i_k} \tilde{p}_{j_k}^{(i_k)} \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{k-1}=1}^{n_{k-1}} \sum_{j_{k+1}=1}^{n_{k+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N} \tilde{p}_{j_1}^{(i_1)} \dots \tilde{p}_{j_N}^{(i_N)}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N} \tilde{p}_{j_1}^{(i_1)} \dots \tilde{p}_{j_N}^{(i_N)}}, \end{aligned} \quad (2.46)$$

де $C_{j_1 j_2 \dots j_N} = \prod_{m=1}^{N-1} \prod_{l=m+1}^N c_{m j_m, j_l}$.

Відповідно, відносні оцінки конфігурацій:

$$\tilde{P}(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = \frac{C_{j_1 j_2 \dots j_N} \tilde{p}_{j_1}^{(i_1)} \dots \tilde{p}_{j_N}^{(i_N)} \prod_{i=1}^N n_i}{\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N} \tilde{p}_{j_1}^{(i_1)} \dots \tilde{p}_{j_N}^{(i_N)}}. \quad (2.47)$$

Наведемо аналоги табл. 2.5, 2.6, в яких порівнюються абсолютні і відносні оцінки вірогідності альтернатив параметрів (табл. 2.7, 2.8):

Таблиця 2.7 – Порівняння абсолютних і відносних оцінок ймовірності альтернатив параметрів з табл. 2.5

1. Стадія			2. Тривалість			3. Причина		
Альт-ва	Абс. оцінка	Відн. оцінка	Альт-ва	Абс. оцінка	Відн. оцінка	Альт-ва	Абс. оцінка	Відн. оцінка
1.1	0,102	0,917	2.1	0,408	1,632	3.1	0,069	0,55
1.2	0,136	1,222	2.2	0,326	1,303	3.2	0,169	1,35
1.3	0,082	0,738	2.3	0,155	0,621	3.3	0,115	0,917
1.4	0,081	0,731	2.4	0,111	0,444	3.4	0,098	0,788
1.5	0,094	0,849				3.5	0,246	1,971
1.6	0,127	1,146				3.6	0,107	0,854
1.7	0,234	2,102				3.7	0,055	0,44
1.8	0,043	0,388				3.8	0,141	1,13
1.9	0,101	0,906						

Таблиця 2.8 – Порівняння абсолютних і відносних оцінок конфігурацій для морфологічної таблиці 2.6 (неможливі конфігурації пропущено)

Конфігурація	Опис	Абсолютна ймовірність	Відносна ймовірність
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_1^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Неправильно оформлені документи	0,00597	1,71841
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_2^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Неякісний вантаж	0,01066	3,07142
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_3^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Нестача місця на коліях	0,00778	2,23937
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_5^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Нестача змінного персоналу	0,01298	3,73841
$\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_6^{(3)}\}$	Комерційний огляд / До 1 години / Нестача рухомого складу	0,00634	1,82557
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_1^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Неправильно оформлені документи	0,00447	1,28855
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_2^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Неякісний вантаж	0,00894	2,57578
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_3^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Нестача місця на коліях	0,00571	1,64416
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_5^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Нестача змінного персоналу	0,00981	2,82436
$\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}, a_6^{(3)}\}$	Комерційний огляд / 1–3 години / Нестача рухомого складу	0,00476	1,37126
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_1^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Неправильно оформлені документи	0,00182	0,52425
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_2^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Неякісний вантаж	0,00426	1,22688
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_3^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Нестача місця на коліях	0,00226	0,64981
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_5^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Нестача змінного персоналу	0,00362	1,0428
$\{a_1^{(1)}, a_3^{(2)}, a_6^{(3)}\}$	Комерційний огляд / Від 3 годин до доби / Нестача рухомого складу	0,00205	0,59169
...

Таблиці 2.7, 2.8 ілюструють, наскільки відносні оцінки є більш наглядними і легше сприймаються. Найбільшу увагу привертають оцінки, що більше за 1, тобто більше, ніж середнє значення при однакових оцінках всіх альтернатив. Особливо цей ефект корисний для оцінок конфігурацій, оскільки навіть у фрагменті таблиці

одразу стає зрозумілим, які конфігурації є більш вірогідними. При використанні абсолютних оцінок для такого висновку необхідно було б або розглядати таблицю конфігурацій повністю (при цьому навіть для такої невеликої морфологічної таблиці кількість конфігурацій становить 288), або виводити середнє значення і порівнювати з ним решту оцінок, що вже при порядку оцінок $10^{-2} \dots 10^{-4}$ є незручним.

Окремо слід зазначити, що такий прийом розгляду оцінок дає можливість природно визначати ступінь впливу спеціальної альтернативи, пов'язаної із інформаційною невизначеністю (п. 2.2.2). Якщо необхідно розглядати випадок неповноти інформації щодо множини альтернатив деякого параметра, додається альтернатива «Інше» з відносною оцінкою $\tilde{p}_{\text{інше}}^{(i)} = 1$, причому додавання такої альтернативи не змінює відносні оцінки інших альтернатив.

2.7 Альтернативний спосіб врахування значень матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів

В ряді задач, які розв'язувались за допомогою МММА з використанням експертного опитування, зокрема [82, 136], в ході налаштування моделі було помічено, що для більшої відповідності результатів реальному життю доводиться вносити незначні корективи у параметри моделі, що взагалі є природним процесом удосконалення моделі. Однак, оскільки такі корективи були достатньо однотипними, був проведений аналіз причин, і виявилось, що природа цієї невідповідності лежить у способі врахування матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів. Цей недолік проявляється рідко, лише при деяких співвідношеннях між значеннями матриці взаємозв'язків. Однак, оскільки в задачах якісного аналізу не існує однозначних «правильних» рішень, результат має бути якомога реалістичнішим відповідно до думки експерта, тому було проведено дослідження щодо іншого алгоритму врахування матриці взаємозв'язків альтернатив параметрів.

За процедурою оцінювання і використання матриці взаємозв'язків в МММА значення матриці перетворюються на масштабні коефіцієнти для конфігурацій морфологічної таблиці, які відповідно змінюють їх ймовірність на величину від -100% до $+100\%$. Можна помітити, що значення приросту ймовірності в 100% не зовсім відповідає опису значення «1» в матриці взаємозв'язків, оскільки не виключає решту конфігурацій, що було зроблено свідомо з ряду причин. Взагалі, такому значенню повинний відповідати нескінченний масштабний коефіцієнт, що не є допустимим в поточному алгоритмі МММА. Крім того, значення «1» зустрічається рідко, оскільки при правильній побудові морфологічних таблиць необхідність у повністю пов'язаних альтернативах практично відпадає.

Тому у попередніх дослідженнях було вирішено зупинитись саме на наведеній вище процедурі врахування значень матриці взаємозв'язків. В переважній більшості задач вона генерує правдоподібні результати. Однак при побудові і оцінюванні морфологічних моделей, описаних в Розд. 6, деякі альтернативи після розрахунків отримували значення ймовірності, які були менше, ніж в очікуваннях експертів. Ця проблема була виправлена незначною переоцінкою вхідних даних, але викликала необхідність дослідити причини цієї невідповідності.

Виявилось, що така проблема спостерігалась, коли морфологічна таблиця продукувала велику кількість конфігурацій, які містили протилежні значення матриці взаємозв'язків (наприклад, $0,5$ і $-0,5$). З точки зору експерта ці значення лежать на однаковій відстані від центра, однак поточний алгоритм обробки матриці взаємозв'язків призначає відповідні масштабні коефіцієнти у 150% і 50% , які спільно дають значення 75% замість очікуваних 100% . Якщо це трапляється для одиничних конфігурацій, цей ефект практично непомітний, однак для великих морфологічних таблиць із великим розкидом значень матриці взаємозв'язків вплив цього явища може накопичуватись.

Якщо узагальнити, проблема полягає у більшій вазі від'ємних значень матриці взаємозв'язків порівняно із додатними. Для виправлення цього дисбалансу було

розглянуто два підходи: модифікація процедури оцінювання матриці взаємозв'язків і модифікація процедури врахування її значень.

Модифікація процедури оцінювання матриці взаємозв'язків. Оскільки існуюча процедура врахування значень матриці взаємозв'язків є достатньо надійною, і в більшості випадків дає адекватні результати, є сенс спробувати переосмислити процедуру оцінювання.

Логічним рішенням видається перевести оцінки матриці взаємозв'язків в інтервал $[0, \infty)$, і переводити результати опитувальної форми, що мають однакову відстань від центра, у зворотні оцінки. Значення нескінченності в такому випадку має бути замінене на деяке велике скінченне значення через деструктивний вплив присутності нескінченності у процедурі методу. Таке оцінювання призведе до менш інтуїтивного вигляду матриці взаємозв'язків, оскільки протилежні оцінки в діапазоні вірогідності будуть суттєво відрізнятись (наприклад, 0,25 і 4). Іншим підходом було б використання логарифмічної шкали, яка поміщає значення матриці взаємозв'язків у інтервал $(-\infty, \infty)$, однак це призведе до більш незрозумілого для непідготовленого користувача вигляду матриці взаємозв'язків, оскільки неможливі пари альтернатив є звичайним явищем, і матриця може містити велику кількість значень $-\infty$.

Однак навіть якщо не звертати увагу на презентабельність такої матриці, в цьому підході з'являється проблема із додатними значеннями, оскільки масштабний коефіцієнт встановлює перевагу конфігурації над усім полем конфігурацій, тому зріст ймовірності буде більшим ніж очікується, особливо для великих морфологічних таблиць. Це означає, що такий прийом не виправляє баланс, а навпаки, зміщує його у протилежний бік, так що еквівалентні додатні значення стають більш вагомими, ніж від'ємні. Експерименти показують, що такий дисбаланс стає ще більш очевидним.

Модифікація процедури врахування значень матриці взаємозв'язків. Для подолання вищезазначеного недоліку пропонується альтернативний спосіб врахування значень матриці взаємозв'язків, в якому використовується принципово інший підхід порівняно із використанням масштабних коефіцієнтів.

Для обґрунтування і ілюстрації цього підходу, його відмінностей від існуючого підходу, і впливу на метод розглянемо простий сценарій 1:

Сценарій 1. Компанія А планує підписати угоду з двома іншими компаніями, компанією Б і компанією В. Компанія А розглядає результати майбутньої зустрічі як морфологічну таблицю з двома параметрами: «1. Позиція компанії Б» і «2. Позиція компанії В». Обидва параметра мають по дві альтернативи – «Погоджується», «Відмовляється». Також компанія А оцінює вірогідності підписання угоди кожною з інших компаній окремо (табл. 2.9). Величини ймовірностей взяті для прикладу і не мають особливого значення.

Таблиця 2.9 – Морфологічна таблиця для сценарію 1

1. Позиція компанії Б		2. Позиція компанії В	
Альтернатива	$p_j^{(i)}$	Альтернатива	$p_j^{(i)}$
1.1. Погоджується	0,8	2.1. Погоджується	0,4
1.2. Відмовляється	0,2	2.2. Відмовляється	0,6

Морфологічна таблиця створює чотири можливих конфігурації, які при відсутній або заповненій нулями матриці взаємозв'язків мають ймовірності:

$$\begin{aligned}
 P(\{B : \text{погоджується}, V : \text{погоджується}\}) &= 0,32; \\
 P(\{B : \text{погоджується}, V : \text{відмовляється}\}) &= 0,48; \\
 P(\{B : \text{відмовляється}, V : \text{погоджується}\}) &= 0,08; \\
 P(\{B : \text{відмовляється}, V : \text{відмовляється}\}) &= 0,12.
 \end{aligned}
 \tag{2.48}$$

Додамо до цього сценарію нові дані: якщо одна з двох компаній відмовляється підписувати угоду, друга компанія також відмовиться. Це можна описати матрицею взаємозв'язків, як показано в табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Матриця взаємозв'язків 1 для сценарію 1

		2. Позиція компанії В	
		2.1. Погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. Погоджується	0	0
	1.2. Відмовляється	0	1

Покажемо, що існуюча процедура МММА не здатна адекватно обробити цей сценарій. Після розрахунків за допомогою існуючої процедури МММА з табл. 2.9, 2.10 отримаємо такий результат (табл. 2.11):

Таблиця 2.12 – Ймовірності конфігурацій для сценарію 1 при матриці взаємозв'язків з табл. 2.11

		2. Позиція компанії В	
		2.1. Погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. Погоджується	0,286	0,429
	1.2. Відмовляється	0,071	0,214

Очевидно, цей результат є неправильним, оскільки конфігурації $\{a_2^{(1)}, a_1^{(2)}\}$ і $\{a_1^{(1)}, a_2^{(2)}\}$ є неможливими при матриці взаємозв'язків з табл. 2.10. Цю невідповідність можна подолати, додавши до матриці взаємозв'язків похідну інформацію: оскільки альтернативи $a_2^{(1)}$ і $a_2^{(2)}$ не можуть бути поєднані з іншими альтернативами, то інші конфігурації у відповідному рядку та стовпчику є неможливими (табл. 2.12):

Таблиця 2.12 – Матриця взаємозв'язків 2 для сценарію 1

		2. Позиція компанії В	
		2.1. Погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. Погоджується	0	-1
	1.2. Відмовляється	-1	1

Така матриця взаємозв'язків генерує інший набір ймовірностей конфігурацій (табл. 2.13):

Таблиця 2.13 – Ймовірності конфігурацій для сценарію 1 при матриці взаємозв'язків з табл. 2.12

		2. Позиція компанії В	
		2.1. Погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. Погоджується	0,429	0
	1.2. Відмовляється	0	0,571

Це виглядає більш правильним. Спірним питанням є, чи варто переписати табл. 2.12 у вигляді табл. 2.14, оскільки конфігурація $\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}\}$ є єдиною можливою конфігурацією, якщо обрана хоча б одна з альтернатив цієї пари:

Таблиця 2.14 – Матриця взаємозв'язків 2 для сценарію 1

		2. Позиція компанії В	
		2.1. Погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. Погоджується	1	-1
	1.2. Відмовляється	-1	1

Тоді отримаємо інший результат (табл. 2.15):

Таблиця 2.15 – Ймовірності конфігурацій для сценарію 1 при матриці взаємозв'язків з табл. 2.14

		2. Позиція компанії В	
		2.1. Погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. Погоджується	0,727	0
	1.2. Відмовляється	0	0,273

Ця зміна до матриці взаємозв'язків є спірною, оскільки вона оперує інформацією, яка не впливає прямо із початкових даних. Тому будемо вважати найбільш правильними результатами процедури МММА ймовірності з табл. 4.9. Однак, якщо уважно придивитись до цих результатів, виникає питання, чому вірогідність конфігурації $\{Б: відмовляється; В: відмовляється\}$ менша за 0,6 (ймовірність того, що В відмовиться)?

Сценарій 1 дозволяє прослідкувати за фактичним перерозподілом ймовірностей при вказаних умовах: очевидно, компанії Б і В обмінюються своїми планами щодо згоди або відмови, і якщо будь-яка з них відмовляється, інша повинна відмовитись незалежно від попереднього власного рішення. Таким чином, ймовірність конфігурації $\{Б: відмовляється; В: відмовляється\}$ має складати 0,2 (ймовірність відмови Б) плюс 0,8 (ймовірність згоди Б), помножене на 0,6 (ймовірність відмови В); іншими словами це сума ймовірностей конфігурацій з (2.48), де хоча б одна з компаній відмовляється. Реалістичні ймовірності представлені в табл. 2.16.

Таблиця 2.16 – Реалістичні ймовірності конфігурацій для сценарію 1

		2. Позиція компанії В	
		2.1. Погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. Погоджується	0,32	0
	1.2. Відмовляється	0	0,68

Використовуючи такий спосіб міркування, бачимо, що конфігурація $\{B: \text{відмовляється}; B: \text{відмовляється}\}$ фактично зібрала всі ймовірності з відповідних рядка і стовпчика, тоді як ймовірність конфігурації $\{B: \text{відмовляється}; B: \text{відмовляється}\}$ залишилась тією ж, що і до появи матриці взаємозв'язків. Це явище можна описати з іншої точки зору: пара альтернатив, якій відповідає значення матриці взаємозв'язків «1» в табл. 2.10, стала «стоком» для ймовірностей у відповідних рядку і стовпчику.

Така концепція є доволі ілюстративною. Змінимо початкові дані: нехай, якщо одна з компаній вирішує відмовитися, то друга компанія відмовиться із деякою ймовірністю, нехай, 0,5. Тоді матрицю взаємозв'язків у табл. 2.10 можна переписати зі значенням $c_{122}=0,5$. Використовуючи ті ж міркування для розрахунку ймовірностей, що і вище, отримаємо результат, занесений в табл. 2.17.

Таблиця 2.17 – Ймовірності конфігурацій для модифікованого сценарію 1

		2. Позиція компанії В	
		2.1. Погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. Погоджується	0,32	0,24
	1.2. Відмовляється	0,04	0,4

Бачимо, що конфігурація $\{B: \text{відмовляється}; B: \text{відмовляється}\}$ знову стала стоком, але цього разу поглинула лише половину від ймовірностей у відповідних рядку і стовпчику.

Схожі міркування можна використати і для від'ємних значень матриці взаємозв'язків, хоча в цьому випадку є певні особливості, які треба врахувати. Розглянемо сценарій 2, в якому змінимо умову підписання обома компаніями на таку: обидві компанії Б і В не стануть підписувати угоду одночасно. Цю умову оформимо у вигляді матриці взаємозв'язків у табл. 2.18:

Таблиця 2.18 – Матриця взаємозв'язків для сценарію 2

		2. Позиція компанії В	
		2.1. погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. погоджується	-1	0
	1.2. Відмовляється	0	0

Відповідно до використаної раніше логіки, якщо незалежно одна від одної компанії прийдуть до конфігурації $\{B: \text{погоджується}; V: \text{погоджується}\}$, одна з них змушена буде змінити своє рішення. Насправді обидві компанії в такому випадку могли б змінити своє рішення, однак ми будемо вважати, що зміна має бути мінімальною; якщо одна з компаній змінить своє рішення, то потреби в зміні думки іншою компанією відпаде.

При цих міркуваннях конфігурація $\{B: \text{погоджується}; V: \text{погоджується}\}$ стає «витоком» ймовірності, передаючи її іншим конфігураціям у відповідних рядку і стовпчику. Це піднімає питання, в якій пропорції потрібно розподілити «надлишок» ймовірності між рядком і стовпчиком. З точки зору розглядуваного сценарію, компанія, яка мала меншу ймовірність згоди в цій конфігурації, буде більш схильною змінити своє рішення. За вхідними даними з табл. 2.9, компанія Б більш схильна до підписання угоди (ймовірність 0,8 проти ймовірності 0,4 у компанії В), тому розподілимо ймовірність конфігурації пропорційно з коефіцієнтом $(1-0,8)$ для конфігурації $\{B: \text{відмовляється}; V: \text{погоджується}\}$ і коефіцієнтом $(1-0,4)$ для конфігурації $\{B: \text{погоджується}; V: \text{відмовляється}\}$. Таким чином, після перерахунку отримуємо наступні ймовірності:

Таблиця 2.19 – Ймовірності конфігурацій для сценарію 2

		2. Позиція компанії В	
		2.1. погоджується	2.2. Відмовляється
1. Позиція компанії Б	1.1. погоджується	0	0,72
	1.2. Відмовляється	0,16	0,12

Так само, як і для додатних значень матриці, від'ємні значення в інтервалі від -1 до 0 означатимуть, що лише частина ймовірності, рівна модулю значення матриці взаємозв'язків, «перетікає» до інших конфігурацій.

Виклавши засади цього підходу, можна сформулювати більш строгий математичний алгоритм його застосування. Для врахування всіх можливих структур матриці взаємозв'язків було зроблено ряд припущень:

- Від'ємні і додатні значення матриці взаємозв'язків обробляються окремо і послідовно: спочатку множина конфігурацій розглядається тільки з від'ємними значеннями, наче всі додатні значення дорівнюють нулю; після цього, навпаки, множина конфігурацій розглядається тільки з додатними значеннями, наче всі від'ємні значення дорівнюють нулю;
- Назвемо суму ймовірностей з усіх витоків у рядку (стовпчику) «надлишком» ймовірностей у відповідному рядку (стовпчику). Цей надлишок розподіляється між усіма конфігураціями у цьому рядку (стовпчику) пропорційно а) оберненому значенню матриці взаємозв'язків, і б) повній ймовірності альтернативи, що відповідає цьому рядку (стовпчику). В будь-якому випадку, виток не прийматиме надлишок ймовірності, якщо він є найбільш потужним витком в цьому рядку (стовпчику);
- Якщо в рядку (стовпчику) декілька стоків, величина найбільш потужного стоку стає коефіцієнтом відбору для цього рядка (стовпчика). Кожна конфігурація в цьому рядку (стовпчику) віддає частину своєї ймовірності, рівну різниці між коефіцієнтом відбору і своїм значенням матриці взаємозв'язків. Величина відбору є сумою всіх зібраних ймовірностей, вона розподіляється між конфігураціями у рядку (стовпчику) пропорційно а) оберненому значенню матриці взаємозв'язків, і б) повній ймовірності альтернативи, що відповідає цьому рядку (стовпчику). Це припущення необхідне для обробки випадків, де сума значень матриці взаємозв'язків більша за 1.

Ґрунтуючись на цих припущеннях, розробимо алгоритм для будь-якої морфологічної таблиці з двох параметрів, пов'язаних матрицею взаємозв'язків, заповненою будь-якими допустимими значеннями. Для спрощення записів позначатимемо $c_{1j_1, 2j_2}$ через $c_{j_1 j_2}$.

Етап 1. Обчислення незалежних ймовірностей. Для кожної конфігурації $\{a_{j1}^{(1)}, a_{j2}^{(2)}\}$ незалежна ймовірність p_{j1j2} розраховується як добуток відповідних ймовірностей альтернатив:

$$p_{j1j2} = P(a_{j1}^{(1)})P(a_{j2}^{(2)}).$$

Етап 2. Врахування від'ємних значень матриці взаємозв'язків. Для спрощення записів введемо позначення:

$$c_{j1j2}^- = \begin{cases} c_{j1j2}, & c_{j1j2} < 0, \\ 0, & c_{j1j2} \geq 0. \end{cases}$$

Крок 2.1. Для кожної конфігурації $\{a_{j1}^{(1)}, a_{j2}^{(2)}\}$ розрахуємо надлишок $s_{j1j2} = -c_{j1j2}^- p_{j1j2}$ і залишок $r_{j1j2} = (1 + c_{j1j2}^-) p_{j1j2}$.

Крок 2.2. Для кожного рядка i розрахуємо загальний надлишок в рядку:

$$s_i^h = \sum_{j=1}^{n_2} s_{ij} \frac{(1 - p_i^{(1)})}{(1 - p_i^{(1)}) + (1 - p_j^{(2)})}.$$

Крок 2.3. Для кожного стовпчика j розрахуємо загальний надлишок в стовпчику:

$$s_j^v = \sum_{i=1}^{n_1} s_{ij} \frac{(1 - p_j^{(2)})}{(1 - p_i^{(1)}) + (1 - p_j^{(2)})}.$$

Крок 2.4. Для кожної конфігурації $\{a_{j1}^{(1)}, a_{j2}^{(2)}\}$ розрахуємо її коефіцієнт розподілу в рядку:

$$d_{j1j2}^h = \begin{cases} (\min_{j2 \in [1; n_2]} c_{j1j2}^- - c_{j1j2}^-) p_{j1}^{(1)} / \min_{j2 \in [1; n_2]} c_{j1j2}^-, & s_{j1}^h > 0, \\ 0, & s_{j1}^h = 0, \end{cases}$$

і її коефіцієнт розподілу в стовпчику:

$$d_{j1j2}^v = \begin{cases} (\min_{j1 \in [1; n_1]} c_{j1j2}^- - c_{j1j2}^-) p_{j2}^{(2)} / \min_{j1 \in [1; n_1]} c_{j1j2}^-, & s_{j2}^v > 0, \\ 0, & s_{j2}^v = 0. \end{cases}$$

Крок 2.5. Для кожної конфігурації $\{a_{j1}^{(1)}, a_{j2}^{(2)}\}$ розрахуємо нормований коефіцієнт розподілу в рядку:

$$\tilde{d}_{j_1 j_2}^h = \begin{cases} d_{j_1 j_2}^h / \sum_{j_2=1}^{n_2} d_{j_1 j_2}^h, & s_{j_1}^h > 0, \\ 0, & s_{j_1}^h = 0, \end{cases}$$

і нормований коефіцієнт розподілу в стовпчику:

$$\tilde{d}_{j_1 j_2}^v = \begin{cases} d_{j_1 j_2}^v / \sum_{j_1=1}^{n_1} d_{j_1 j_2}^v, & s_{j_2}^v > 0, \\ 0, & s_{j_2}^v = 0. \end{cases}$$

Крок 2.6. Для кожної конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}\}$ розрахуємо нову ймовірність:

$$p'_{j_1 j_2} = r_{j_1 j_2} + \tilde{d}_{j_1 j_2}^h s_{j_1}^h + \tilde{d}_{j_1 j_2}^v s_{j_2}^v.$$

Етап 3. Врахування додатних значень матриці взаємозв'язків. Для спрощення записів введемо позначення:

$$c_{j_1 j_2}^+ = \begin{cases} c_{j_1 j_2}, & c_{j_1 j_2} > 0, \\ 0, & c_{j_1 j_2} \leq 0. \end{cases}$$

Крок 3.1. Для кожного рядка i розрахуємо коефіцієнт відбору: $T_i^h = \max_{j \in [1; n_2]} c_{ij}^+$.

Крок 3.2. Для кожного стовпчика j розрахуємо коефіцієнт відбору:

$$T_j^v = \max_{i \in [1; n_1]} c_{ij}^+.$$

Крок 3.3. Для кожної конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}\}$ розрахуємо відбір:

$$t_{j_1 j_2} = \max(T_{j_1}^h - c_{j_1 j_2}^+, T_{j_2}^v - c_{j_1 j_2}^+) p'_{j_1 j_2}$$

і залишок

$$r'_{j_1 j_2} = (1 - \max(T_{j_1}^h - c_{j_1 j_2}^+, T_{j_2}^v - c_{j_1 j_2}^+)) p'_{j_1 j_2}.$$

Крок 3.4. Для кожного рядка i розрахуємо сумарний відбір з рядка:

$$t_i^h = \sum_{j=1}^{n_2} t_{ij}.$$

Крок 3.5. Для кожного стовпчика j розрахуємо сумарний відбір зі стовпчика:

$$t_j^v = \sum_{i=1}^{n_1} t_{ij}.$$

Крок 3.6. Для кожної конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}\}$ розрахуємо її коефіцієнт розподілу в рядку:

$$d_{j_1 j_2}^{rh} = \begin{cases} c_{j_1 j_2}^+ p_{j_1}^{(1)} / T_{j_2}^h, t_{j_1}^h > 0, \\ 0, t_{j_1}^h = 0, \end{cases}$$

і її коефіцієнт розподілу в стовпчику:

$$d_{j_1 j_2}^{rv} = \begin{cases} c_{j_1 j_2}^+ p_{j_2}^{(2)} / T_{j_1}^v, t_{j_2}^v > 0, \\ 0, t_{j_2}^v = 0. \end{cases}$$

Крок 3.7. Для кожної конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}\}$ розрахуємо нормований коефіцієнт розподілу в рядку:

$$\tilde{d}_{j_1 j_2}^{rh} = \begin{cases} d_{j_1 j_2}^h / \sum_{j_2=1}^{n_2} d_{j_1 j_2}^h, s_{j_1}^h > 0, \\ 0, s_{j_1}^h = 0, \end{cases}$$

і нормований коефіцієнт розподілу в стовпчику:

$$\tilde{d}_{j_1 j_2}^{rv} = \begin{cases} d_{j_1 j_2}^v / \sum_{j_1=1}^{n_1} d_{j_1 j_2}^v, s_{j_2}^v > 0, \\ 0, s_{j_2}^v = 0. \end{cases}$$

Крок 3.8. Для кожної конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}\}$ розрахуємо нову ймовірність:

$$p_{j_1 j_2}'' = r'_{j_1 j_2} + \tilde{d}_{j_1 j_2}^{rh} t_{j_1}^h + \tilde{d}_{j_1 j_2}^{rv} t_{j_2}^v.$$

Отримані значення $p_{j_1 j_2}''$ є значеннями ймовірності конфігурації з урахуванням матриці взаємозв'язків. Як і в звичайній розрахунковій процедурі МММА, нові індивідуальні ймовірності альтернатив можна розрахувати як суму всіх ймовірностей конфігурацій, що містять відповідну альтернативу:

$$p_{j_1}''^{(1)} = \sum_{j_2=1}^{n_2} p_{j_1 j_2}''.$$

Узагальнення алгоритму. Хоча алгоритм найкраще ілюструється на морфологічній таблиці з двома параметрами, його можна узагальнити для випадку довільної морфологічної таблиці. Основна складність полягає в тому, що

кожній конфігурації відповідатиме набір значень матриці взаємозв'язків, і ця конфігурація може слугувати витокком або стоком в залежності від обраного двовимірного зрізу багатовимірного простору конфігурацій.

Тому для запропонованої процедури необхідні деякі доповнення:

- на етапі 2 будь-яка конфігурація вважається витокком, якщо має у відповідному їй наборі значень матриці взаємозв'язків хоча б одне від'ємне значення. Така конфігурація генерує надлишок ймовірності, величина якого визначається мінімальним значенню матриці взаємозв'язків із набору. Цей надлишок розподіляється між параметрами пропорційно до добутку мінімального значення матриці взаємозв'язків, що відповідають цьому параметру у конфігурації, і протилежному значенню ймовірності альтернативи цього параметра у розглядуваній конфігурації. В інших аспектах етап 2 виконується аналогічно, за винятком того, що слова «рядок/стовпчик» замінюються на «і-й параметр».
- На етапі 3 кожну конфігурацію розглядають по осях усіх параметрів, і коефіцієнт відбору визначається потужність найбільшого стоку в будь-якій з осей. Решта етапу 3 виконується аналогічно, за винятком того, що слова «рядок/стовпчик» замінюються на «і-й параметр».

Запропонований підхід є перспективним шляхом вдосконалення врахування матриці взаємозв'язків у МММА, оскільки він надає змістовності процедурам розрахунку з використанням матриці взаємозв'язків. Однак потрібно зазначити, що простий сценарій, який розглядався, є лише прикладом, сконструйованим таким чином, щоб процеси перетікання ймовірності було легко пояснити. В реальному світі більшість задач не має таких очевидних шляхів формування ймовірностей, тому обґрунтування цього шляху врахування матриці взаємозв'язків може бути некоректним.

Неважко підібрати контрприклад: представимо морфологічну таблицю для аварій з двома параметрами: 1) місце аварії (перехрестя або нерегульована частина дороги), і 2) причина аварії (перевищення швидкості або рух на червоне

світло). Очевидно, що альтернатива «рух на червоне світло» має завжди відповідати альтернативі «перехрестя», але обернене твердження невірне, тому жодна можлива матриця взаємозв'язків не відповідає коректному запису цього сценарію.

Основним обмеженням є обов'язкове припущення про симетрію матриці взаємозв'язків як в старому, так і в новому підходах. Відкидання цього припущення, хоча й можливе математично, несе в собі різке ускладнення методу для експертів і аналітика. Тому вибір способу врахування матриці взаємозв'язків покладається на аналітика, і рекомендується проведення подальших досліджень для пошуку більш досконалих процедур.

Висновки за розділом 2

1. Розглянуто недосконалості вхідних даних в складних системних задачах, такі як неточність, неповнота, протирічність, нечіткість, недостовірність. Запропоновані прийоми, процедури, алгоритми визначення проявів впливу цих НЕ-факторів для задач, що розв'язуються за допомогою МММА, а також способи і модифікації методу, що дозволяють зменшувати наслідки цих невизначеностей, і отримувати адекватні результати навіть в умовах недосконалих вхідних даних, враховуючи їх природу.

2. Вдосконалено математичний апарат МММА, що дозволило створити процедури оцінювання чутливості моделі, тобто визначення допустимих змін вхідних даних, що не призводять до зміни результату. Таким чином створено механізм протидії неточності вхідних даних за рахунок перевірки можливості впливу похибки на результат, і визначення найбільш критичних елементів вхідних даних, на які слід звернути особливу увагу. Чутливість розглянута відносно різних елементів вхідних даних – попередніх оцінок альтернатив і значень матриць зв'язків. Процедура аналізу чутливості продемонстрована на модельному прикладі.

3. Розроблено прийоми використання МММА в умовах неповноти вхідних даних. Сформовано алгоритм дій у випадку пропусків оціночної вхідної інформації. Розглянуто питання повноти множини альтернатив параметрів, запропоновано прийоми оцінювання доповнюючої альтернативи на основі різних міркувань, які можуть бути використані в залежності від конкретної задачі. Розроблено процедури оцінювання повноти множини альтернатив параметра МТ на основі аналізу ненормованих експертних оцінок для морфологічної моделі, які враховують типи параметрів.

4. Розроблено процедуру оцінювання протирічності вхідних даних у вигляді МВЗАП. Запропонована процедура використовує позитивні оцінки МВЗАП як мірило схожості альтернатив, що дозволяє визначити неузгодженості у трійках альтернатив, зв'язки між якими можуть бути задані невірно і мають бути переглянуті.

5. Розроблено нечітку модифікацію методу морфологічного аналізу, в якій на основі використання нечітких попередніх оцінок альтернатив розраховуються нечіткі оцінки з урахуванням взаємозв'язків між параметрами. Модифікація містить три етапи: визначення нормованих нечітких оцінок альтернатив; визначення нечітких оцінок конфігурацій на основі нормованих нечітких оцінок альтернатив; визначення нечітких оцінок альтернатив з урахуванням взаємозв'язків між параметрами на основі нечітких оцінок конфігурацій. Для кожного кроку обґрунтовані два підходи до визначення функції належності – інтегральний і екстремальний. Знайдено аналітичне рішення при використанні трикутних функцій належності з екстремальним підходом на першому кроці.

6. Запропоновано процедуру аналізу упередженості моделі для оцінювання можливої її недостовірності, в якій проводиться процедура МММА на тривіальних даних, що дає змогу експерту визначити, наскільки модель є адекватною, до використання на реальних вхідних даних.

7. Розроблено процедуру МММА з відносними оцінками, яка дає змогу більш наглядно представляти результати розрахунків методу, запобігаючи можливим помилкам і невідповідностям уявленням експертів.

8. Досліджено вплив МВЗАП на результати МММА, і запропоновано альтернативний підхід до врахування МВЗАП в МММА, що ґрунтується на принципі витоків і стоків ймовірностей альтернатив конфігурацій, який в деяких задачах може призвести до більш адекватних результатів.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [73, 100, 101, 105, 168, 169].

РОЗДІЛ 3

РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛУ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ В РАМКАХ МЕТОДОЛОГІЇ ПЕРЕДБАЧЕННЯ

Системна задача освоєння підземного простору мегаполісів, як і будь-яка складна сучасна міждисциплінарна задача, супроводжується швидкою генерацією надвеликих масивів даних і знань, обробка яких зазвичай виходить за межі можливостей людини. Навіть експерту у відповідній галузі стає важко підтримувати актуальність знань, що призводить до надмірної спеціалізації і фрагментування знань. Ця проблема дістала назву «великих даних» (Big Data) – даних, що характеризуються так званими «трьома V» – надвеликим об'ємом (Volume), різноманітністю (Variety), швидкістю появи (Velocity) [14, 38].

В методології передбачення обробка даних виконується на першому етапі – попереднього вивчення проблеми [144]. Для можливості роботи з великими даними існує ряд різноманітних інструментів – таких, як текстова аналітика і сентимент-аналіз [16, 47], інженерія знань і теорія онтологій [39, 48], інструменти обробки природної мови на основі штучного інтелекту [30, 60] тощо. Метою цього розділу є створення інструментів інтеграції МММА у процес передбачення за рахунок використання результатів обробки великих масивів даних.

3.1 Виявлення і побудова морфологічних таблиць з семантичної мережі

Від коректного, адекватного, продуктивного опису об'єкта в МММА часто залежить успішність процесу передбачення в цілому. Тому побудова морфологічних таблиць є надзвичайно важливим етапом, що забезпечує відповідність результату реальній картині світу.

Побудова морфологічних таблиць є творчим процесом, кінцевий результат якого може бути забезпечений тільки людиною-аналітиком. Однак через великі обсяги даних у складних багатопараметричних задачах цей процес може бути

занадто трудомістким для проведення його вручну. Недосконалість морфологічних таблиць може поставити надійність результату всього МММА під загрозу. Тому існує необхідність у створенні прийомів для автоматичної побудови морфологічних таблиць на основі наявної бази знань щодо тієї галузі, яка розглядається.

3.1.1 Дослідження видів морфологічних таблиць і їх елементів

3.1.1.1 Причини невизначеності об'єкта дослідження в МММА

Для того, щоб сформулювати принципи автоматичного видобування морфологічних таблиць із баз знань, необхідно досконале розуміння процесу морфологічного опису об'єкта. Дослідимо можливі джерела невизначеності щодо об'єкта, який розглядається за допомогою МММА. Об'єкт морфологічного дослідження повинен мати велику кількість конфігурацій, тобто альтернативних варіантів реалізації, що може бути спричинено такими факторами:

1) відсутня детальна інформація про конфігурацію об'єкта. Така відсутність інформації може бути зумовлена тим, що а) об'єкт розглядається в майбутньому – через деякий проміжок часу або після настання певної події; або б) ОПР і аналітик на момент розв'язання задачі не мають можливості отримати точну інформацію з технічних або інших причин (наприклад, якщо розглядається будова поверхні іншої планети або плани конкуруючої організації);

2) необхідно розглянути різноманіття конфігурацій об'єкта у сукупності. В даному випадку за допомогою морфологічної таблиці описується множина об'єктів, характеристики або складові яких можуть бути відомими, а невизначеність полягає у тому, яка саме конфігурація альтернатив параметрів об'єкта з'явиться при наступній реалізації. Прикладом таких об'єктів морфологічного аналізу можуть бути аварії в транспортній системі міста або профілі користувачів деякої системи;

3) приймається рішення, яку конфігурацію об'єкта обрати. Формально цей випадок схожий на перший, однак принципова відмінність полягає в тому, що невизначеність не спричинюється зовнішніми факторами, тому тільки вибір рішення ОПР є розкриттям цієї невизначеності. Такий тип об'єктів є найважчим щодо автоматичного видобування морфологічної таблиці, оскільки генерація параметрів і альтернатив в даному випадку часто сама по собі є надзвичайно складною творчою задачею, яка не може бути вирішена за допомогою аналізу великих обсягів даних.

3.1.1.2 Типи об'єктів опису морфологічної таблиці

Далі звернемо увагу на те, що саме описується морфологічною таблицею, оскільки від цього залежить, сутність з якою роллю в базі даних є утворюючою для морфологічної таблиці.

- Опис об'єкта. Метою створення такої морфологічної таблиці є опис заданого матеріального або нематеріального об'єкта або системи. Невизначеність притаманна самому об'єкту через один із трьох факторів, зазначених вище. Історично метод морфологічного аналізу застосовувався вперше саме з метою синтезу нових або вдосконалених фізичних об'єктів, зокрема технічних систем.
- Опис стану. Метою створення такої морфологічної таблиці є опис стану деякого об'єкта або, частіше, системи. Сам об'єкт або система, як правило, відомі, невизначеність полягає в першу чергу в тому, що саме відбувається або відбуватиметься в об'єкті морфологічного дослідження. Прикладом такого дослідження може бути опис стану економіки країни через проміжок часу. Основними параметрами морфологічної таблиці є показники, що характеризують відповідний об'єкт або систему.
- Опис дії. Метою створення такої морфологічної таблиці є опис певної події або взаємодії між об'єктами. Система, в рамках якої взаємодіють об'єкти, як правило, є відомою; невизначеність може полягати у стані цієї системи

(контекст події), у об'єктах, які беруть участь у події, і в характеристиках перебігу самої події. Прикладом об'єктів дослідження такої морфологічної таблиці можуть бути аварії або варіанти впровадження продукту компанією на ринок.

Як бачимо, кожний наступний вид морфологічної таблиці може потребувати наявності попередніх. В залежності від необхідності деталізації опису і наявності причинних зв'язків можна або формувати мережу морфологічних таблиць, або включати релевантні елементи морфологічного опису однієї сутності до морфологічного іншої сутності, яка оперує першою сутністю.

3.1.1.3 Типи параметрів морфологічної таблиці

Важливою з точки зору створення прийомів автоматичного видобування морфологічних таблиць є класифікація параметрів морфологічної таблиці. Виділимо такі типи параметрів:

1) бінарні («так»/«ні», «є»/«немає») – параметри, альтернативами яких є наявність або відсутність певного елемента або характеристики у об'єкта дослідження або відповідь на логічне питання щодо об'єкта. Також ці параметри використовуються для випадків, коли необхідно імітувати параметр з можливістю вибору декількох альтернатив одночасно;

2) діапазонні – параметри щодо певної величини або показника у об'єкта дослідження. Альтернативами є частини діапазону цієї величини.

Можна виділити підтипи цього типу параметрів за обмеженістю:

- обмежені – діапазон значень відповідної величини обмежений з обох боків (наприклад, ймовірність, процент);
- необмежені – діапазон значень відповідної величини необмежений принаймні з одного боку (час, прибуток, кількість тощо).

За видом представлення величини можна виділити такі підтипи:

- числові – альтернативи мають вигляд «від ... до ...»;

- вербальні – величина описується словами, що буває зручно для нефізичних величин або у випадках, коли точні межі діапазонів встановити неможливо або недоцільно (наприклад, альтернативи «дуже малий», «малий», «середній», «великий», «дуже великий»);
- порівняльні – величина порівнюється вербально з певною величиною – еталонною, середньою, очікуваною тощо (наприклад «менше середнього», «середнє», «більше середнього»).

3) якісні – альтернативи таких параметрів принципово (якісно) відрізняються між собою. Такі альтернативи є елементами класу об'єкта, заданого параметром.

3.1.1.4 Вимоги до побудови морфологічних таблиць

Для нормального функціонування МММА можна сформулювати такі вимоги до побудови морфологічних таблиць:

- **релевантність параметрів** – параметр повинен залежати або впливати на хоча б один інший параметр (в рамках деталізації, яка обрана для задачі). Для цього хоча б одна з альтернатив параметра повинна бути пов'язаною матрицею взаємозв'язків із хоча б однією іншою альтернативою. При невиконанні цього правила утворюється незалежний параметр, наявність якого ніяк не впливає на результат і не несе користі для дослідника;
- **взаємовиключність альтернатив** – для роботи розрахункового апарату МММА стани кожного параметра повинні бути взаємовиключними. Якщо це правило не виконується, необхідно переформулювати множину параметрів та/або альтернатив;
- **повнота множини альтернатив** – для кожного параметра множина альтернатив повинна бути повною, щоб реалізації параметра у вигляді кожної з альтернатив являли собою повну групу подій. Якщо неможливо або недоцільно сформулювати всі можливі альтернативи, додається альтернатива «інші». Якщо вибір однієї з альтернатив

параметра є не обов'язковою подією, додається альтернатива «немає»/«не потрібно» тощо.

3.1.2 Видобування морфологічних таблиць із бази знань

3.1.2.1 Побудова морфологічної таблиці для опису об'єкта

Використовуючи описану вище інформацію щодо об'єктів опису морфологічної таблиці, можна співвіднести різним типам параметрів фрагменти мережі сутностей. Почнемо з найбільш простого типу морфологічної таблиці, опису об'єкта. Якщо підходити з точки зору архітектури бази знань, то параметрами і альтернативами морфологічної таблиці можуть стати:

1. Параметр – класифікація об'єкта за деяким розрізом, альтернативи – підкласи об'єкта в цьому розрізі;
2. Параметр – характеристика об'єкта, альтернативи – можливі значення або діапазони значень цієї характеристики;
3. Пункти 1, 2, 3 для елементів (підоб'єктів) об'єкта.

Таким чином, процедура конструювання морфологічної таблиці може виконуватись рекурсивно, з глибиною деталізації в залежності від потреб задачі. Розглянемо приклад фрагмента семантичної мережі (рис. 3.1) і морфологічну таблицю (табл. 3.1), побудовану на його основі:

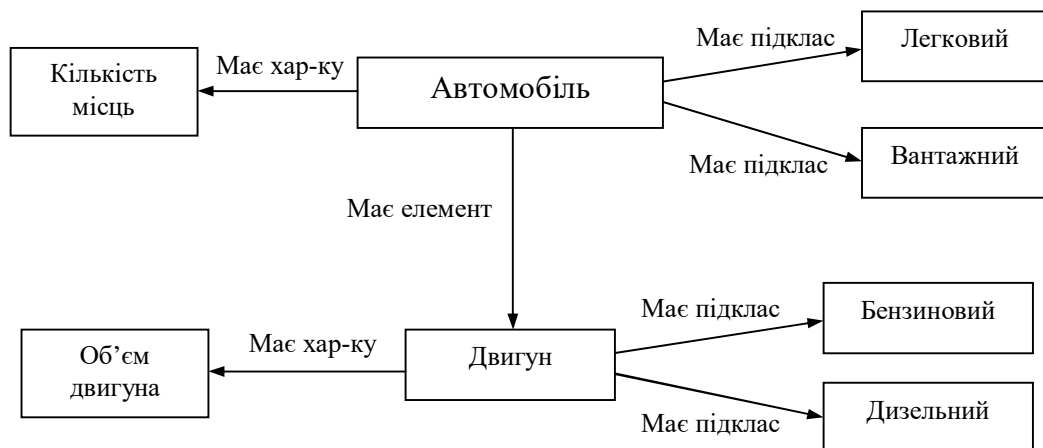


Рисунок 3.1 – Фрагмент семантичної мережі для об'єкта «Автомобіль»

На основі цього фрагмента можна побудувати морфологічну таблицю (табл. 3.1):

Таблиця 3.1 – Морфологічна таблиця для об'єкта «Автомобіль»

Характеристичні параметри об'єкта «Автомобіль»			
Тип	К-ть місць	Тип двигуна	Об'єм двигуна
Легковий	2	Бензиновий	До 1,6 л
Вантажний	3	Дизельний	1,6–2 л
	4		2–3 л
	Більше 4		Більше 3 л

Процес побудови аналітиком морфологічної таблиці ґрунтується на інтерактивному режимі із базою знань.

1. Аналітик обирає об'єкт бази знань, щодо якого виконується побудова морфологічної таблиці.

2. Система шукає і пропонує аналітику підкласи об'єкта. Аналітик, якщо вважає за потрібне, формує із них параметри і альтернативи морфологічної таблиці.

3. Система шукає і пропонує аналітику характеристики об'єкта. Аналітик, якщо вважає за потрібне, формує із них параметри і визначає альтернативи морфологічної таблиці.

4. Система по черзі пропонує складові об'єкта. Якщо аналітик вважає доцільним вводити в морфологічну таблицю альтернативні варіанти цієї складової об'єкта, система виконує кроки 2–4 для цього підоб'єкта. Також, якщо аналітик вважає, що наявність або відсутність цієї складової є важливими для задачі, вводиться бінарний параметр щодо цієї складової об'єкта.

Процедура повторюється, доки множина пропозицій не буде вичерпана.

3.1.2.2 Побудова морфологічної таблиці для опису стану об'єкта або системи

Основний акцент в таких задачах ставиться на значення показників об'єкта дослідження і пов'язаних з ним об'єктів. Тому основними групами параметрів в морфологічній можуть бути:

1. Значення показників або характеристик, які має об'єкт дослідження.

2. Значення показників або характеристик, які мають пов'язані об'єкти або системи (опис їх стану). Серед них можуть бути підсистеми об'єкта дослідження, надсистеми (опис зовнішнього впливу, контекст) і пов'язані об'єкти того ж рівня. Наприклад, для опису стану комерційної компанії параметрами можуть бути показники успішності окремих її підрозділів, показники стану національної економіки, дії компаній-конкурентів.

3. Опис пов'язаних об'єктів (включаючи рішення, що могли бути прийнятими щодо об'єкта дослідження і вплинути на його стан).

Таким чином, морфологічна таблиця описує ситуацію, яка відбувається як у самому об'єкті (внутрішні показники або характеристики), так і з його оточенням (зовнішні показники або характеристики). У випадку складних задач з високим рівнем деталізації буває недоцільно зводити всі параметри в одну морфологічну таблицю. Тоді об'єкти, які потребують деталізації, описуються окремою морфологічною таблицею, а зв'язок встановлюється за допомогою матриці зв'язків. Такий прийом особливо доцільний для опису зовнішніх впливів, які можуть скласти основу для використання двоетапного МММА.

В описі стану системи також можуть бути об'єкти, які включаються в морфологічну таблицю за наведеною вище процедурою опису об'єктів. Наприклад, стан комерційної компанії може залежати від характеристик продукту, який вона вирішить випускати. Тоді є сенс описати продукт морфологічною таблицею, використовуючи базу знань і включити релевантні параметри до опису стану компанії. Це також є прикладом рішень, які приймалися щодо об'єкта дослідження.

Важливо також зазначити, що хоча початковий вузол для опису стану об'єкта обирається так само, як і в п. 3.1.2.2, подальша процедура пропонування параметрів дещо відрізняється, оскільки класифікація об'єкта в цьому випадку є нерелевантною, а його складники важливі тільки з точки зору їх станів. Це викликано тим, що сам об'єкт в такому випадку не є невизначеним. Наприклад, якщо будується МТ для майбутнього стану заданого підприємства, немає сенсу

включати інформацію про те, що, наприклад, підприємства поділяються на малі, середні і великі, або інформацію про різновиди підрозділів, які бувають у підприємств. Ми знаємо, до якого класу відноситься це підприємство, і яку конкретну структуру має, тому більшість кроків, описаних у п. 3.1.2.1 будуть в цьому випадку нерелевантними.

3.1.2.3 Побудова морфологічної таблиці для опису дії (події)

З точки зору видобування із бази знань такі морфологічні таблиці є найбільш складними через наявність декількох об'єктів або систем, які є критичними для побудови морфологічної моделі, і їх невизначеність. Подія може мати свої класифікації, і в ній завжди присутній як мінімум один (як правило, більше), об'єктів, що взаємодіють. Параметрами для морфологічної таблиці, що описує певну подію, є:

1. Характеристики і підкласи події, що розглядається (сама подія з семантичної точки зору тут розглядається як об'єкт).
2. Опис причетних об'єктів.
3. Опис станів причетних об'єктів.
4. Опис стану системи, в рамках якої відбувається подія (контекст).
5. Причини виникнення події (якщо їх доцільно розглядати).

Видобування перших чотирьох груп параметрів вже описано в пп. 3.1.2.1–3.1.2.2, оскільки вони являють собою або опис об'єкта (пп. 1–2), або опис стану об'єкта (пп. 3–4). Початковим вузлом для генерації морфологічної таблиці є сама подія, і її класифікація стає основою для морфологічної таблиці. Будь-яка подія включає мінімум один діючий об'єкт, класифікація якого також може бути релевантною або нерелевантною в залежності від цілей дослідження. Наприклад, якщо розглядаються аварії в транспортній системі міста, то водій і його автомобіль (пов'язані з подією об'єкти) є потенційними вузлами для подальшої класифікації. Якщо виконується соціальне дослідження, то можуть бути релевантними такі параметри як стать або вік водія; з іншого боку, якщо це

дослідження стосується тільки транспортної безпеки, то ці параметри будуть нерелевантними, тоді як інші параметри можуть бути важливими (наприклад, психічний стан водія).

Особливо важливим є опис зовнішньої системи, в рамках якої відбувається подія, оскільки вона задає контекст цієї події. Іноді можна розглядати декілька надсистем: наприклад, аварія відбувається в рамках транспортної системи міста (що задає місце виникнення аварії – перехрестя, дорога, міст тощо), однак можна розглядати її і ширше, в рамках природного середовища, яке характеризується погодою, часом доби тощо.

Параметри причин є більш складними для видобування, оскільки їх присутність у базі знань може бути неявною. Звичайно, для деяких подій (наприклад, природні явища) цей параметр є неактуальним, однак в інших задачах він може бути суттєвим. Тому для цього параметра можуть бути запропоновані такі прийоми:

- якщо проводився SWOT-аналіз щодо системи, в рамках якої відбувається подія, або залучених об'єктів, альтернативами параметра причини можуть стати слабкі сторони або загрози, визначені SWOT-аналізом;
- також причини можуть бути присутніми у моделях байєсівських мереж щодо події, яка розглядається. Такий спосіб визначення альтернатив параметра причини для МММА є особливо вигідним, оскільки байєсівська мережа дає оцінки для матриці взаємозв'язків, які можуть бути використані в методі.

Таким чином, запропоновані прийоми видобування морфологічних матриць дозволяють використовувати великі об'єми неструктурованої інформації для напівавтоматичної побудови моделей МММА. Крім того, властивості і принципи побудови морфологічних таблиць також можуть використовуватися для більш формалізованої побудови морфологічних таблиць дослідниками в ручному режимі.

Продемонструємо деякі принципи запропонованого підходу для морфологічної класифікації боргів клієнтів по кредитах, використовуючи фрагмент семантичної мережі з рис. 3.2.

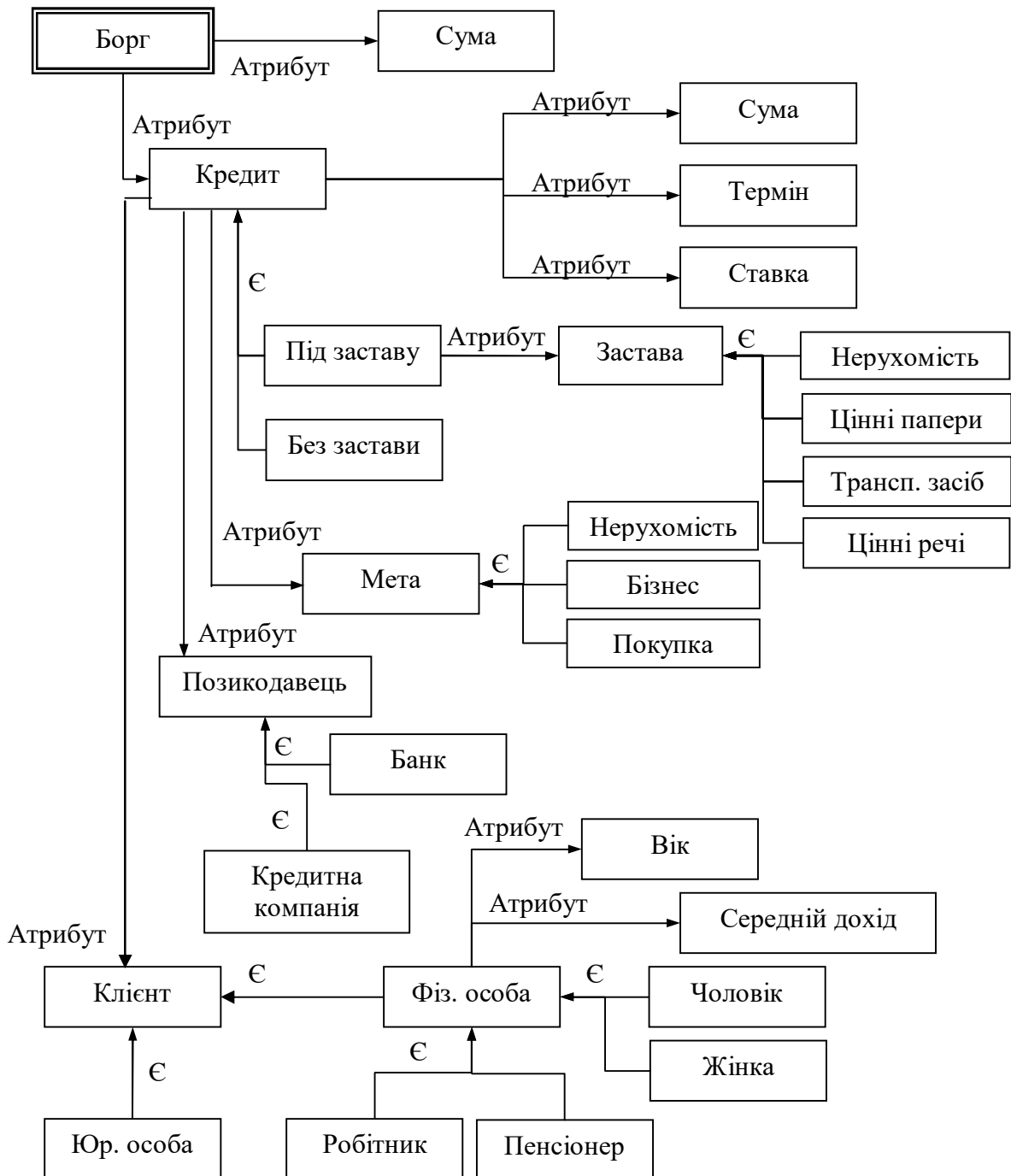


Рисунок 3.2 – Фрагмент семантичної мережі для вузла «Борг за кредитом»

Починаючи з вузла «Борг», видобуваємо параметр на основі його атрибута:

1. Сума боргу (з діапазонами). Конкретні діапазони тут і далі вказуватись не будуть, оскільки вони не є метою цього прикладу.

Далі переходимо до вузла «Кредит», і видобуваємо наступні параметри на основі його числових атрибутів:

2. Сума кредиту (з діапазонами).
3. Термін кредиту (з діапазонами).
4. Процентна ставка по кредиту (з діапазонами).

Цей вузол також має ряд пов'язаних вузлів, які можуть стати основою для морфологічних параметрів. Наприклад, можна додати параметр, оснований на класифікації кредитів:

5. Тип кредиту (під заставу/без застави).

Якщо далі вивчати вузол «Кредит під заставу», то можна додати ще один параметр на основі класифікації застав:

6. Тип застави (нерухомість, цінні папери, транспортний засіб, цінні речі).

Тут виникає невідповідність: якщо параметри 5 і 6 є окремими, тоді альтернатива «без застави» все одно мусить бути поєднаною з одним із типів застав, що створює протиріччя. Це можна виправити або додавши альтернативу «немає» до параметра 6, і встановивши відповідні зв'язки у МВЗАП, або в цьому випадку може бути простіше звести ці два параметри в один:

5а. Тип кредиту (під заставу нерухомості/під заставу цінних паперів/під заставу транспортного засобу/під заставу цінних речей/без застави).

Пов'язаний вузол «Мета кредиту» додає ще одну класифікацію:

7. Мета кредиту (нерухомість/бізнес/покупка/не зазначено).

Альтернатива «не зазначено» була додана до списку альтернатив. В цілому, кожна класифікація, що призводить до створення якісного параметру, має бути розглянута на предмет додавання альтернативи «Немає» або «Інше», щоб забезпечити повноту множини альтернатив (див. Розділ 2.2).

Ще одна класифікація може бути додана на основі вузла «Позикодавець»:

8. Позикодавець (банк/кредитна компанія).

Проте, цей параметр має сенс тільки якщо з позикодавцем пов'язана невизначеність. Наприклад, якщо деякий банк проводить таке дослідження для аналізу боргів за кредитами у своєму портфолію, то цей параметр є беззмістовним,

оскільки він стає визначеним. З іншого боку, якщо це дослідження здійснюється деяким фінансовим або моніторинговим органом, що вивчає кредитну систему в цілому, то такий параметр може бути використаний. Звісно, самі по собі вузли «Банк» і «Кредитна компанія» також є семантично багатими вузлами, і за потреби можуть бути деталізовані сильніше.

Ще один вузол, пов'язаний з «Кредитом» – це «Клієнт», що створює параметр:

9. Тип клієнта (фізична особа/юридична особа).

Вузол «Фізична особа» має багато семантичних зв'язків, деякі з яких можуть виявитись важливими у дослідженні (вік, середній дохід, класифікації за статтю, статусом і т.д.), однак ці атрибути стають актуальними тільки якщо в параметрі 9 обрана альтернатива «Фізична особа», тоді як для «Юридичної особи» ці параметри не мають сенсу. Цю проблему важче обійти, ніж для параметрів 5 і 6, оскільки фізичні і юридичні особи мають дуже різні класифікації без перетинів, і намагались включити їх в одну МТ буде практично неможливою задачею. Однак у цьому випадку це, ймовірно, не потрібно, оскільки аналіз проблеми боргів фізичних і юридичних осіб – це зовсім різні задачі, які потребують різних підходів і рішень, тому включати їх в одну морфологічну таблицю контрпродуктивно. В цьому випадку спеціалісту з МММА слід обрати тільки одну з гілок, і обирати класифікаційні параметри саме на ній.

Як бачимо, навіть такий малий, обмежений фрагмент семантичної мережі запропонував більше 10 характеристичних параметрів для МТ; крім того, як зазначалось, багато з цих вузлів також є семантично багатими, і можуть деталізуватись далі. Автоматизований прохід по семантичній мережі може запропонувати десятки параметрів, тому задачею аналітика є обмеження пошуку по вузлах, які непотрібні для подальшої деталізації. Приклад також показав, що в автоматизованій процедурі видобування параметрів деякі коригування спеціалістом з морфологічного аналізу все одно потрібні.

Дана мережа не дозволяє добути параметр «Причина виникнення боргу», який, ймовірно, важливий, оскільки він є критичним для дослідження, і

взаємопов'язаний з рядом ідобутих параметрів. В цьому випадку нам доводиться або звернутись до знань експерта чи аналітика, або використати один із прийомів, описаних вище.

3.2 Оцінювання морфологічних таблиць на основі результатів текстової аналітики

Основним джерелом отримання вхідної оціночної інформації в МММА є експертне опитування, оскільки цей метод, як метод якісного аналізу, призначений для видобування знань, досвіду, інтуїції експертів щодо прийняття рішень у соціотехнічних, соціоекономічних та інших складних системах. Однак відносно невелика швидкість проведення і обробки експертного опитування є суттєвим обмеженням в тих задачах, де постійно генеруються значні обсяги інформації, і велику роль відіграє вчасність прийняття рішень. При необхідності швидкого реагування на події проведення повноцінних експертних опитувань часто стає неможливим, і основним джерелом отримання даних стають методи обробки слабкоструктурованої інформації [30, 47].

Основним завданням проведення даного напрямку досліджень є доповнення необхідної вхідної інформації МММА даними, отриманими із аналізу великих обсягів текстової інформації, зокрема коментарів, суджень, висловлювань учасників процесу, що досліджується. При достатній автоматизації процесу збору і обробки корпусу текстів розроблені алгоритми дозволяють оперативно проводити розрахунки МММА і швидко отримувати інформацію, необхідну для супроводження процесу прийняття рішень.

Зазначимо, що в МММА присутні два типи вхідної оціночної інформації, до яких ставляться принципово різні вимоги:

1) оцінки матриць зв'язків (взаємозв'язків) альтернатив параметрів. Ці оцінки фактично описують природу відношень між параметрами об'єкта, вони практично не змінюються з часом і разом з морфологічними таблицями являють собою основу моделі класу об'єктів дослідження. Для цих оцінок точність більш

важлива, ніж швидкість отримання, тому коректне автоматизоване видобування цих оцінок потребуватиме дуже великого корпусу вхідної текстової інформації;

2) попередні оцінки ймовірностей альтернатив. Ці оцінки є вхідними даними для моделі, вони описують конкретний об'єкт класу або конкретний стан системи, що досліджується. Для багатьох задач характерна зміна цих оцінок з часом, іноді досить швидкоплинна [171]. Для цього типу вхідної інформації пріоритетною є оперативність отримання.

Для роботи з об'єктами в модифікованому методі морфологічного аналізу необхідне оцінювання альтернатив і значень матриці взаємозв'язків, яке пропонується виконувати за допомогою експертного оцінювання. Такий підхід є найбільш точним, але він потребує суттєвих часових та фінансових ресурсів. Крім того, кількість питань до експертів навіть при відносно невеликих таблицях може сягати декількох сотень, що є неприпустимим.

Оскільки описи об'єктів, що розглядаються в процесі передбачення, є переважно вербальними, пропонується залучати до отримання вхідних оцінок інструменти текстової аналітики, зокрема інструменти категоризації і визначення семантичної забарвленості на основі правил.

В модифікованому методі морфологічного аналізу необхідні два типи вхідної оціночної інформації: це попередні оцінки альтернатив і значення матриці взаємозв'язків для пар альтернатив. Для того, щоб мати змогу отримувати такі дані з фрагментів неструктурованої інформації, спочатку необхідно ввести певні правила текстової аналітики, за якими текст можна з деякою мірою впевненості віднести до категорій, що відповідають альтернативам параметрів морфологічної таблиці.

Позначимо через $R_j^{(i)}(g_k)$ правило визначення міри відношення текстового фрагменту g_k до категорії, що відповідає альтернативі $a_j^{(i)}$. Очевидно, такий набір правил необхідно сформулювати для кожної з альтернатив $a_j^{(i)}$ кожного параметру F_i морфологічної таблиці, ці правила повинні визначати, що у тексті йдеться про

об'єкт, характеристика якого, відповідна параметру F_i , має значення, описане альтернативою $a_j^{(i)}$.

Тоді можна сформулювати таку постановку задачі:

Дано:

- морфологічна таблиця з N параметрами $F_i, i \in \overline{1, N}$, кожен з яких має множину альтернатив $a_j^{(i)}, j \in \overline{1, n_i}$;
- множина з N_{text} цілих текстових фрагментів $g_k, k \in \overline{1, N_{text}}$, причому за допомогою інструментів текстової аналітики визначено, що всі ці фрагменти відповідають об'єкту, що описаний морфологічною таблицею;
- $R_j^{(i)}(g_k), i \in \overline{1, N}, j \in \overline{1, n_i}, k \in \overline{1, N_{text}}$ – правила визначення міри відношення текстового фрагменту g_k до категорії, що відповідає альтернативі $a_j^{(i)}$, основані на операторах текстової аналітики.

Потрібно:

- згенерувати попередні оцінки альтернатив $p_j^{(i)}$;
- згенерувати значення матриці взаємозв'язків $c_{i_1 j_1 i_2 j_2}$.

Маючи достатньо великий корпус текстів відносно об'єкту дослідження, можна зробити висновок про розподіл оцінок кожної з альтернатив в рамках характеристичних параметрів морфологічної таблиці. Тоді можна сформулювати такі способи визначення попередніх оцінок альтернатив:

Спосіб 1. Відношення суми мір належностей до категорії, що відповідає альтернативі $a_j^{(i)}$, до загальної суми мір належностей до всіх категорій, що відповідають альтернативам параметру F_i :

$$p_j^{(i)} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{text}} R_j^{(i)}(g_k)}{\sum_{k=1}^{N_{text}} \sum_{j^*=1}^{n_i} R_{j^*}^{(i)}(g_k)}.$$

Спосіб 2. Відношення кількості фрагментів тексту, де ця міра є максимальною, до загальної кількості текстів, де хоча б одна з мір належності до категорій, що відповідають альтернативам параметру F_i , є ненульовою.

$$p_j^{(i)} = \frac{\left| \left\{ g_k \mid R_j^{(i)}(g_k) = \max_{j^* \in \overline{1, n_i}} (R_{j^*}^{(i)}(g_k)), R_j^{(i)}(g_k) > 0 \right\} \right|}{\left| \left\{ g_k \mid \exists j^* \in \overline{1, n_i} : R_{j^*}^{(i)}(g_k) > 0 \right\} \right|},$$

де $|A|$ – потужність множини A , тобто кількість елементів у ній.

Вибір способу обчислення залежить від специфіки задачі. Якщо альтернативи і відповідні їм правила сформульовані таким чином, що одному текстовому фрагменту відповідає, як правило, одна альтернатива, то перший спосіб є прийнятним, якщо ж одному текстовому фрагменту частіше відповідають багато альтернатив з ненульовими мірами належності, то другий спосіб є більш коректним.

Матриця взаємозв'язків встановлює, як між собою співвідносяться альтернативи різних параметрів, тобто характер впливу появи однієї альтернативи в парі на іншу. Для оцінювання значень матриці взаємозв'язків також можна використовувати один із двох способів.

Спосіб 1. Використання кореляції між мірами належності текстових фрагментів до альтернатив із пари, яка пов'язана відповідним значенням матриці взаємозв'язків.

$$c_{i_1 j_1 i_2 j_2} = r(R_{j_1}^{(i_1)}, R_{j_2}^{(i_2)}) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{text}} (R_{j_1}^{(i_1)}(g_k) - \overline{R_{j_1}^{(i_1)}})(R_{j_2}^{(i_2)}(g_k) - \overline{R_{j_2}^{(i_2)}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_{text}} (R_{j_1}^{(i_1)}(g_k) - \overline{R_{j_1}^{(i_1)}})^2 \sum_{k=1}^{N_{text}} (R_{j_2}^{(i_2)}(g_k) - \overline{R_{j_2}^{(i_2)}})^2}},$$

при цьому розглядається множина текстових фрагментів, у яких міра належності хоча б до однієї з альтернатив кожного з параметрів F_{i_1}, F_{i_2} є ненульовою:

$$g_k \in \{g_k \mid \exists j_1^* : R_{j_1^*}^{(i_1)}(g_k) > 0 \wedge \exists j_2^* : R_{j_2^*}^{(i_2)}(g_k) > 0\}.$$

Спосіб 2. Відношення кількості елементів множини текстових фрагментів, де згадуються обидві альтернативи із відповідної пари, до кількості елементів

множини текстових фрагментів, де згадується хоча б одна з альтернатив відповідної пари:

$$c_{i_1 j_1 i_2 j_2} = 1 - 2 \frac{|\{g_k \mid R_{j_1}^{(i_1)}(g_k) > 0 \wedge R_{j_2}^{(i_2)}(g_k) > 0\}|}{|\{g_k \mid R_{j_1}^{(i_1)}(g_k) > 0 \vee R_{j_2}^{(i_2)}(g_k) > 0\}|}$$

Для перевірки розробленого інструментарію за його допомогою оцінювались альтернативи морфологічної таблиці для заяв відносно України у 2013 році. Морфологічна таблиця мала вигляд (табл. 3.2):

Таблиця 3.2 – Морфологічна таблиця заяв щодо України

Заяви щодо України		
1. Сторона	2. Предмет	3. Тон
ЄС	Вибори	Позитивний
НАТО	Євроінтеграція	Нейтральний
Росія	Економіка	Негативний
США		

Для проведення оцінювання застосоване програмне забезпечення SAS Content Categorization Studio і вибірка з 3805 текстових фрагментів (новини за 2013 рік). На основі правил SAS були побудовані ознаки, фрагменти яких наведені на рис. 3.3.

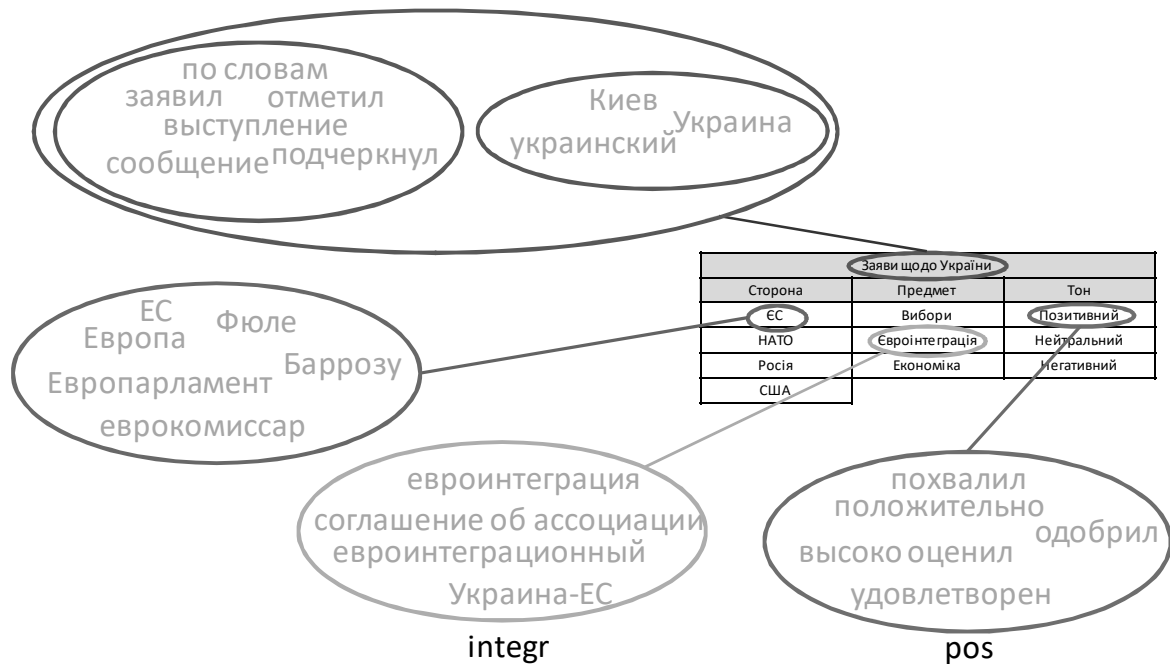


Рисунок 3.3 – Фрагменти ознак щодо альтернатив морфологічної таблиці

На основі розробленого інструментарію отримані початкові оцінки (табл. 3.3):

Таблиця 3.3 – Початкові оцінки альтернатив на основі аналізу текстових фрагментів

Заяви щодо України		
1. Сторона	2. Предмет	3. Тон
0,569	0,216	0,051
0,064	0,386	0,903
0,307	0,398	0,046
0,06		

Аналогічно була оцінена матриця взаємозв'язків (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Оцінки матриці взаємозв'язків на основі аналізу текстових фрагментів

		1. Сторона				2. Предмет		
		1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3
2. Предмет	2.1	-0,292	-0,268	-0,43	-0,125			
	2.2	0,245	-0,413	-0,388	-0,063			
	2.3	-0,32	-0,442	0,345	0,31			
3. Тон	3.1	-0,521	-0,71	-0,824	-0,781	-0,564	-0,164	-0,345
	3.2	0,585	0,507	0,758	0,375	0,869	0,869	0,902
	3.3	-0,524	-0,797	-0,879	-0,594	-0,51	-0,184	-0,388

Такий підхід до отримання вхідних даних дає можливість працювати з великими морфологічними таблицями, не створюючи надмірне навантаження на експертів, однак потребує наявності достатньо великої кількості текстової інформації з галузі дослідження і певних зусиль із налаштування інструментів текстової аналітики.

Результат оцінювання сильно залежить від якості побудови правил належності фрагментів до категорій і від самої вибірки. Можна використовувати

ці оцінки паралельно зі звичайним експертним оцінюванням, як думку окремого «експерта».

Висновки за розділом 3

1. Сформульовано принципи і особливості побудови морфологічних об'єктів: чітко зазначено типи невизначеностей, характерні для об'єктів морфологічного дослідження, класифіковано типи описів і типи параметрів МТ; сформульовано вимоги до МТ.

2. Розроблено інтерактивні людино-машинні процедури напівавтоматизованого видобування морфологічних таблиць із семантичних мереж. Запропоновані процедури для трьох типів морфологічного опису, що поступово ускладнюються: опис об'єкту, опис стану об'єкту, опис дії або події. Створені процедури і особливості їх використання продемонстровано на прикладах переведення фрагментів семантичних мереж у морфологічні таблиці.

3. Розроблено процедури оцінювання вхідних даних в МММА на основі використання результатів текстової аналітики. Ці процедури передбачають існування текстового корпусу з фрагментів інформації, класифікованого засобами текстової аналітики за певними темами, на основі чого формуються як вхідні оцінки альтернатив параметрів, так і оцінки матриць зв'язків. В обох випадках пропонуються альтернативні підходи, вибір яких залежить від задачі і наявної інформації.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [81, 102, 156, 167].

РОЗДІЛ 4

РОЗВ'ЯЗАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМНИХ ЗАДАЧ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖ МОРФОЛОГІЧНИХ ТАБЛИЦЬ

Запровадження використання двоетапної процедури методу морфологічного аналізу [89, 165, 166] суттєво підсилило можливості використання методу, оскільки завдяки використанню цієї процедури морфологічний аналіз перетворився на інструмент підтримки прийняття рішень, де на основі аналізу можливих конфігурацій об'єкта оцінюються альтернативи рішень, які доцільно приймати в умовах ситуаційної невизначеності щодо об'єкта. Однак складні задачі часто потребують більш комплексного представлення об'єктів, що до них залучені, тому в даному розділі пропонується узагальнення цього підходу для мереж морфологічних таблиць довільного розміру і пов'язаності.

4.1 Опис складних систем у вигляді мереж морфологічних таблиць

У випадку використання мереж морфологічних таблиць кожному об'єкту, якому притаманна невизначеність, тобто можливі різні варіанти стану або конфігурації цього об'єкта, відповідає власна морфологічна таблиця. При цьому поняття об'єкта розуміється досить широко: під об'єктом можуть розумітися як матеріальні об'єкти (наприклад, будівля або людський натовп) або системи (наприклад, населений пункт або економічний стан регіону), так і події (наприклад, перебіг деякої катастрофи), і навіть абстрактні поняття (наприклад, наслідки катастрофи або рішення, що приймаються).

Зв'язки між таблицями можуть бути одного із трьох типів:

1) двосторонні. Такий зв'язок означає, що об'єкти взаємопов'язані між собою, і визначення їх ймовірнісного стану відбувається одночасно. Такому зв'язку відповідає матриця взаємозв'язків МММА. З точки зору методу декілька таблиць, пов'язаних двосторонніми зв'язками, створює єдину об'єднану морфологічну таблицю, що обробляється системою рівнянь. Однак, модульний

підхід має ряд переваг. Оскільки кожна таблиця в групі має свою матрицю взаємозв'язків, можна додавати або вилучати таблиці з групи без повторного оцінювання усієї віртуальної матриці взаємозв'язків, що об'єднує всі таблиці в групі. Окремі морфологічні таблиці в групі можуть оцінюватися різними експертами, які володіють знаннями відносно галузі відповідної морфологічної таблиці. Можна створити набір підготовлених морфологічних таблиць з уже оціненими матрицями взаємозв'язків і підставляти їх у мережу, якщо проблему необхідно буде аналізувати в майбутньому з різними складовими. Що ж до матриць зв'язків між морфологічними таблицями, вони є переважно розрідженими і, як правило, більш простими для оцінювання.

2) односторонні (причинні) зв'язки. Це основний тип зв'язків у мережах морфологічних таблиць. Він означає, що стан однієї таблиці залежить від стану іншої таблиці. Між таблицями встановлюється матриця зв'язків, і стан залежної таблиці розраховується на основі стану попередньої таблиці за допомогою другого етапу двоетапної процедури МММА [166].

3) ієрархічні зв'язки. У випадку великих мереж морфологічних таблиць може виникнути необхідність створювати агреговані таблиці, які узагальнюють стан ряду менших таблиць. Між агрегованою таблицею і таблицями, що її породжують, зв'язок ієрархічний. Альтернативи агрегованій таблиці мають ймовірності, розраховані на основі сум ймовірностей конфігурацій менших таблиць.

В найпростішому випадку морфологічні таблиці утворюють ланцюг, як показано на рис. 4.1. Таким ланцюгом можуть стати, наприклад, МТ «подія» – «наслідки» – «рішення».

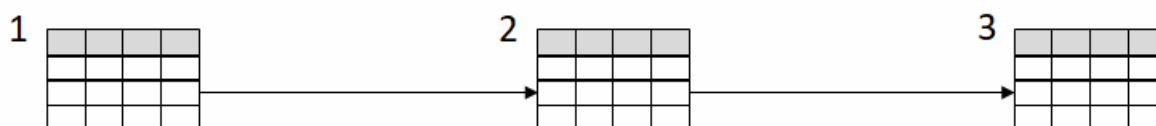


Рисунок 4.1 – Ланцюг морфологічних таблиць

У випадку ситуації, зображеної на рис. 4.1, процедури МММА проводяться у наступному порядку:

1. Одноетапна процедура для МТ 1.
2. Двоетапна процедура для МТ 1 і МТ 2 з метою визначення вхідних оцінок МТ 2.
3. Одноетапна процедура для МТ 2.
4. Двоетапна процедура для МТ 2 і МТ 3 для визначення оцінок МТ 3.

Для більш довгих ланцюгів ці кроки повторюються. Однак в загальному випадку залежності між морфологічними таблицями можна представити у вигляді графу. Окрема таблиця або група морфологічних таблиць, поєднана двосторонніми зв'язками, представляє собою вершину графа, а односторонній зв'язок – ребро графа. Припустимо, що всі процедури експертного оцінювання вже виконані, тобто кожній морфологічній таблиці відповідає набір експертних оцінок незалежної ймовірності і матриць взаємозв'язків, а кожному зв'язку між таблицями – матриця зв'язків. Тоді процедуру розрахунку виконуємо таким чином:

1. Кожний цикл в графі агрегується в одну вершину. Із морфологічних таблиць вершин, що входять у цикл, формується одна віртуальна морфологічна таблиця, яка їх містить. Матриця взаємозв'язків для цієї таблиці формується шляхом об'єднання матриць взаємозв'язків, відповідних таблицям і матриць зв'язків, що описують зв'язки між ними. В результаті отримуємо ациклічний граф.

2. Для кожного витoku графу проводимо процедуру розрахунку оцінок альтернатив його параметрів з урахуванням зв'язків між ними.

3. Для кожної вершини графу, що безпосередньо залежить тільки від розрахованих вершин, проводимо врахування зв'язків із вершинами, що впливають на неї. Отримані оцінки стають базовими оцінками (оцінками незалежної ймовірності/результативності) для відповідної вершини.

4. Для кожної вершини графу, для якої в базових оцінках вже враховані всі залежності від попередніх вершин, проводимо процедуру розрахунку оцінок альтернатив його параметрів з урахуванням зв'язків між ними.

5. Повторюємо кроки 2–4, доки всі вершини не стануть розрахованими.

Стоками графу, як правило, є вершини, яким відповідають морфологічні таблиці рішень.

Приклад мережі морфологічних таблиць показано на рис. 4.2а, а його представлення у вигляді графу – на рис. 4.2б.

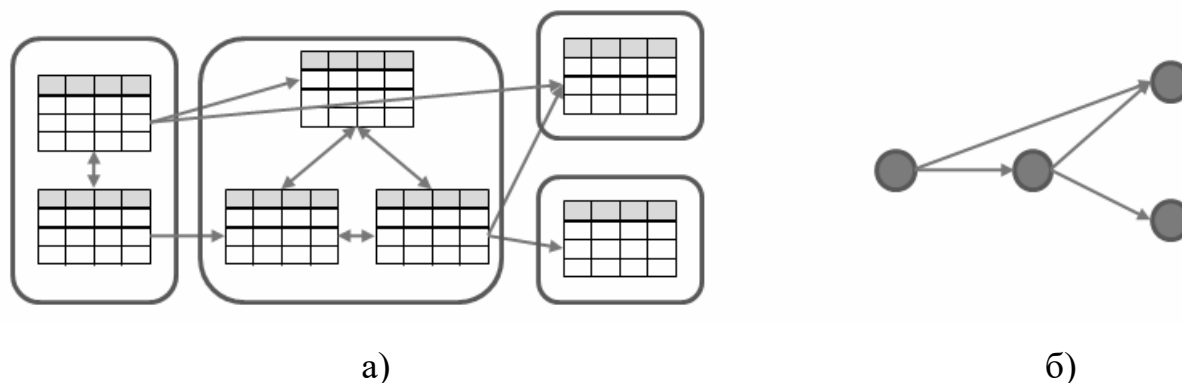


Рисунок 4.2 – Приклад мережі морфологічних таблиць (а), і її представлення у вигляді графу (б)

4.2 Модифікований метод морфологічного аналізу для мереж морфологічних таблиць

Розроблений метод вимагає двох типів вхідної оціночної інформації: попередні оцінки альтернатив параметрів морфологічних таблиць і оцінки матриць зв'язків або взаємозв'язків. Необхідно зазначити, що мережа морфологічних таблиць є моделлю для певної складної системи, і матриці, що поєднують морфологічні таблиці, є частиною цієї моделі. Їх оцінки ґрунтуються на логіці або законах реального світу, і з часом змінюються мало. Тому вважатимемо, що для конкретної мережі морфологічних таблиць оцінювання зв'язків виконується один раз при побудові моделі. З іншого боку, попереднє оцінювання ймовірностей альтернатив відбувається для кожної задачі, яка розв'язується на основі цієї мережі морфологічних таблиць.

У випадку дослідження складних систем за допомогою мереж морфологічних таблиць може бути доцільним узагальнювати стан декількох морфологічних таблиць за допомогою спеціальної морфологічної таблиці вищого рівня, параметрами якої відповідають агрегованим наборам конфігурацій

морфологічних таблиць нижчого рівня. Наприклад, може існувати морфологічна таблиця, параметри якої детально описують стан економіки; конфігурації цієї таблиці агрегуються в один параметр морфологічної таблиці вищого рівня, який має альтернативи «позитивний», «стабільний», «негативний» тощо.

Нехай є ряд морфологічних таблиць, що містять характеристичні параметри F_1, \dots, F_N . Для простоти вважатимемо, що параметри мають наскрізну нумерацію. Морфологічна таблиця вищого ієрархічного рівня має параметри $\tilde{F}_1, \dots, \tilde{F}_N$, причому кожний із параметрів агрегує ряд параметрів морфологічних таблиць нижчого рівня, тобто кожному параметру \tilde{F}_i поставлена у відповідність множина параметрів $\{F_{i_1}, F_{i_2}, \dots, F_{i_n}\}$. Кожній альтернативі $\tilde{a}_k^{(i)}$ відповідає множина конфігурацій морфологічної таблиці, що складається з параметрів $\{F_{i_1}, F_{i_2}, \dots, F_{i_n}\}$. Таку відповідність можна встановити, використовуючи один із декількох алгоритмів групування конфігурацій [170].

Розглянемо використання мережі морфологічних таблиць для задачі моделювання соціальних лих або природних катастроф. Наведемо основні способи роботи із подібною моделлю:

1) оцінювання підготовленості. Оцінюються ймовірності параметрів перебігу певного типу катастрофи для того, щоб розрахувати очікувані результативності запобіжних заходів щодо всієї множини потенціальних варіантів катастрофи. Таким чином можна виділити найбільш критичні альтернативи параметрів, за яких буде заподіяно найбільшої шкоди, або підготовленість до яких є найнижчою.

2) моніторинг. Цей режим є доцільним, коли загроза певного лиха є завжди присутньою, наприклад, для соціальних заворушень. Оцінки морфологічних таблиць періодично перераховуються, і можна отримати раннє попередження при досягненні певними оцінками критичних значень, завчасно виявляючи потенційно катастрофічні ситуації.

3) реакція. Мета – розрахувати потенційну результативність заходів реакції на конкретну ситуацію, яка виникла, або на межі виникнення. Цей режим

найбільш корисний для швидкого прийняття рішення і синтезу стратегії реакції щодо катастрофи.

На рис. 4.3 наведено базову модель у вигляді мережі морфологічних таблиць.

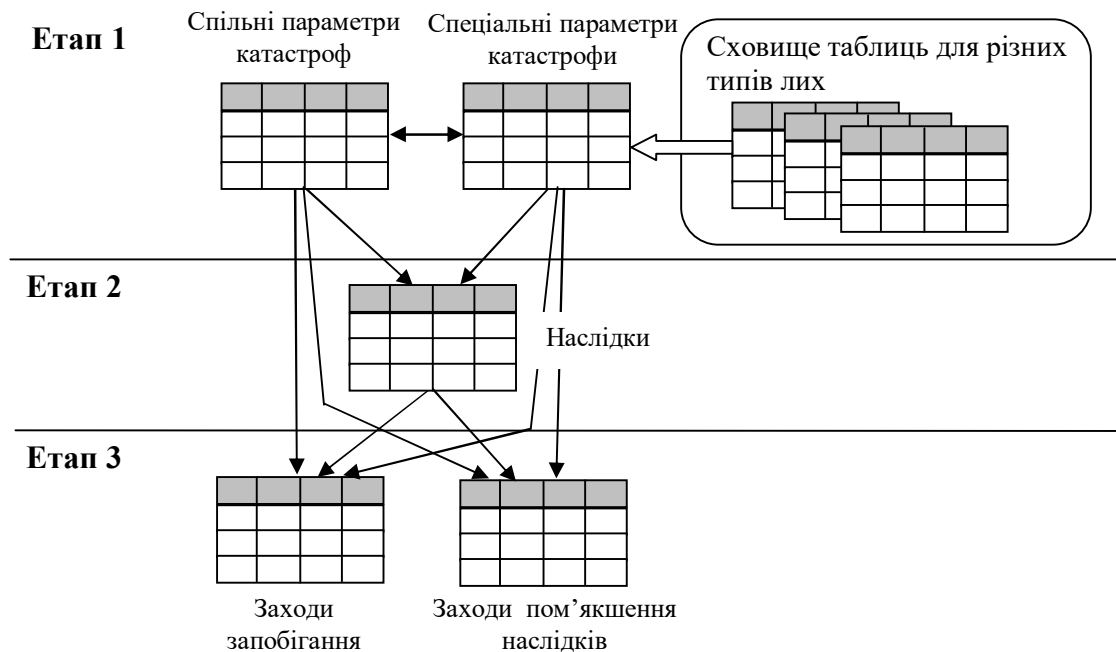


Рисунок 4.3 – Схема мережі морфологічних таблиць для лих і катастроф

Підготовча робота з мережею морфологічних таблиць здійснюється в декілька етапів:

- 1) формується концепція роботи з мережею морфологічних таблиць: визначається список лих і катастроф, з якими працюватиме центр, визначаються рівні деталізації;
- 2) відповідно до визначеної на першому кроці концепції будуються морфологічні таблиці мережі шляхом визначення характеристичних параметрів і їх альтернатив;
- 3) оцінюються взаємозв'язки всередині таблиць і зв'язки між таблицями.

Після цього мережа готова для розв'язання задач трьох типів, вказаних вище. Розглянемо більш детально групи морфологічних таблиць, з яких складається мережа. Оскільки розрахунок мережі фактично йде в три етапи, морфологічні таблиці згруповані відповідно.

На першому етапі знаходяться морфологічні таблиці, що відповідають вхідним даним. Як правило, оцінки альтернатив цих таблиць визначають всі подальші оцінки. Перший етап складається з двох таблиць. Перша таблиця визначає параметри катастрофи, які притаманні будь-яким катастрофам – це в першу чергу параметри контексту – масштаб катастрофи, тривалість і т.д. Можливий вигляд такої таблиці наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Морфологічна таблиця спільних параметрів катастроф

Масштаб	Місцевість	Тривалість дії
Окремий об'єкт	Густа забудова	>1 тижня
Невелика площа/ квартал/декілька об'єктів	Середня забудова	1 тиждень – 3 дні
Середня площа/район/мале місто	Легка збудова/окраїни	3 дні – 1 день
Велика площа/місто	Сільська	1 день – 10 годин
Область	Незаселена	5–10 годин
Декілька областей/країна		1–5 годин
		<1 години
		Одномоментна

Друга таблиця стосується конкретного виду катастроф і містить параметри, специфічні для таких катастроф. Наприклад, якщо розглядаються поведі, морфологічна таблиця може виглядати так (табл. 4.2):

Таблиця 4.2 – Морфологічна таблиця параметрів поведей

Тип	Клас	Основний тригер	Причина	Ландшафт
Повільна	Низький	Тривалі дощі	Антропогенна	Плаский
Миттєва	Високий	Пошкодження дамб або захисних споруд	Природна	Схилястий
	Видатний	Танення снігу		Гірський
	Катастрофічний	Гідрологічні зміни		

Таблиця спеціальних параметрів катастрофи залежить від самої катастрофи, тому доцільно мати репозитарій таблиць для різних типів катастроф, які можуть розглядатись аналітичним центром у процесі його функціонування. Якщо для таких таблиць попередньо оцінена матриця взаємозв'язків, то задачі можуть

розв'язуватись більш оперативно, оскільки в такому випадку витрачається менша кількість часу на оцінювання.

Для морфологічних таблиць першого етапу спосіб оцінювання визначається способом роботи із мережею. Якщо робота з мережею морфологічних таблиць ведеться в режимі оцінки підготовленості, то для морфологічних таблиць першого рівня проводиться експертне опитування щодо оцінок ймовірності альтернатив, і на його основі розраховуються подальші оцінки. Можливий також розгляд задачі, в якій деякі альтернативи вважаються фіксованими, тобто розглядається конкретна підмножина катастроф. На прикладі табл. 4.2 можна розрахувати подальші оцінки тільки для поведей, які мають альтернативу «Катастрофічний» параметру «Клас». Таким чином розглядаються різні можливі ситуації із катастрофами і зрештою обчислюються очікувані результативності відповідних заходів запобігання або пом'якшення наслідків.

Якщо робота з мережею морфологічних таблиць ведеться в режимі моніторингу, оцінки альтернатив можуть визначатись на основі регулярного збору текстової інформації з доступних джерел даних (ЗМІ, Інтернет тощо) за допомогою інструментів текстової аналітики, її категоризації і переведення у форму оцінок для морфологічної таблиці (підрозд. 3.2).

Якщо робота з мережею морфологічних таблиць ведеться в режимі реакції, то на першому етапі обираються ті альтернативи морфологічних таблиць, які відповідають катастрофі, що вже сталася.

Друга група мережі морфологічних таблиць складається з однієї таблиці – таблиці наслідків катастрофи. В цій таблиці містяться релевантні параметри, які описують ситуацію, що може статись в результаті виникнення лиха або катастрофи. В табл. 4.3 міститься приклад морфологічної таблиці для цього етапу.

Таблиця 4.3 – Морфологічна таблиця наслідків катастрофи

1. Тип загрози	2. Ступінь загрози	3. Будівлі	4. Запаси питної води	5. Енергомережа	6. Транспортна доступність	7. Потенціал для заворушень
Прямий	Немає	Цілі	Достатні	Ціла	Без обмежень	Немає
Біологічний	Низький	Переважаючі цілі	Частково достатні	Частково пошкоджена	Пошкоджені або погані дороги	Хвилювання
Хімічний	Середній	Суттєва шкода	Недостатні	Сильно пошкоджена	Недоступно для звичайного транспорту	Безпорядок, непоко́ра, вандалізм
Радіаційний	Високий	Зруйновані	Відсутні/Зруйновані			Масові заворушення, повстання
Психологічний	Дуже високий					

Як правило, незалежні оцінки альтернатив встановлюють однаковими, вважаючи, що немає причин априорно віддати перевагу одній з альтернатив параметрів. Однак, в деяких випадках може бути доцільно для цієї таблиці також провести попереднє оцінювання. Наприклад, якщо розглядається регіон, де дороги мають погану прохідність, то параметр «транспортна доступність» із табл. 4.3 априорно матиме більші значення альтернатив 4.2, 4.3.

На третьому етапі містяться морфологічні таблиці рішень. Для адекватної побудови таких таблиць необхідні експерти у відповідних галузях, тому на початку роботи аналітичного центру доцільно виконувати дослідження із оцінювання підготовленості, в яких під керівництвом аналітиків експерти також будуватимуть таблиці третього етапу. Також варто зазначити, що таблиці рішень можуть бути як спільними для всіх типів катастроф, так і спеціальними для конкретних типів катастроф (наприклад, поведей). Приклад морфологічної таблиці рішення щодо пом'якшення наслідків катастроф наведено в табл. 4.4. Ця таблиця може стосуватися будь-яких катастроф.

Таблиця 4.4 – Морфологічна таблиця рішення щодо пом'якшення наслідків катастрофи

Запобігання дії катастрофи на людей	Необхідна допомога	Залучені підрозділи	Необхідний транспорт, обладнання
Евакуація	Медична	Волонтери	Не потребується
Тимчасові укриття	Фізіологічна	Місцеві підрозділи МНС	Автомобілі, автобуси
Тимчасові інженерні споруди	Їжа, питна вода	Державні підрозділи МНС	Спеціальні інженерні
		Національна гвардія	Гелікоптери
			Військові

Так само, як і для другого етапу, за замовчуванням альтернативи таблиць цього етапу вважаються рівномірними до врахування впливу таблиць попередніх етапів, однак із деяких міркувань (наприклад, економічних), може бути проведено попереднє оцінювання альтернатив.

Варто зазначити, що мережа з рис. 4.3 є базовою і може бути доповнена в залежності від потреб. Зокрема, доцільним може бути додання морфологічної таблиці, яка описує контекст (наприклад, економічний, екологічний або соціальний), в якому розглядається ситуація із катастрофами або соціальними лихами. В такому випадку мережа морфологічних таблиць може виглядати, як зображено на рис. 4.4.

В такому випадку таблиця параметрів контексту є найбільш базовою і оцінюється в першу чергу, оскільки здійснює вплив на решту морфологічних таблиць.

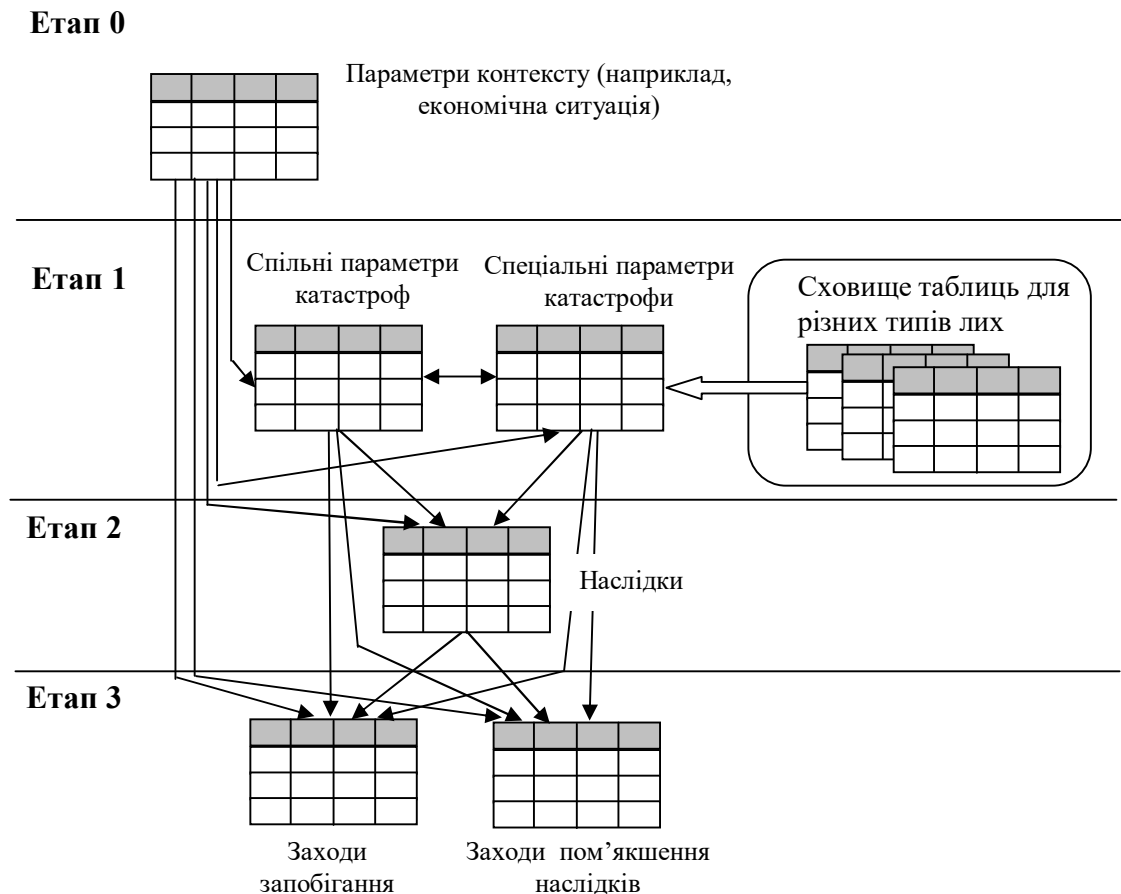


Рисунок 4.4 – Розширена мережа морфологічних таблиць для лих і катастроф

Висновки за розділом 4

1. Процедуру двоетапного МММА узагальнено на випадок складних системних задач, в яких взаємодіє значна кількість сутностей. Розглядається більш простий випадок поєднання морфологічних таблиць у вигляді ланцюга, для якого ітеративно застосовуються перший і другий етапи методу, так і загальний випадок довільного поєднання МТ односторонніми та двосторонніми зв'язками, що призводить до необхідності формувати відповідний мережі граф, і обробляти його за допомогою спеціальної процедури.

2. Розглянуто використання мереж морфологічних таблиць у трьох режимах: оцінювання підготовленості – базова оцінка рішень, що адресують деяку задачу або проблему, для надання підтримки прийняття рішень щодо результативності

відповідних заходів; моніторинг – використання МММА у поєднанні з описаним у розділі 3 автоматизованим оцінюванням на основі текстової аналітики для завчасного виявлення потенційно небажаних подій, що можна побачити завдяки перевищенню порогових значень певних оцінок МТ; реакція – розв’язання задачі з фіксованим параметром у випадку, коли небажана подія вже відбулась, і необхідно оперативно прийняти рішення для пом’якшення наслідків. Використання МММА з мережею морфологічних таблиць продемонстровано на прикладі задачі моделювання і пом’якшення наслідків соціальних лих, викликаних катастрофами і тероризмом.

Матеріали розділу викладені в роботах [69, 103, 104, 106, 163, 170].

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ

Для імплементації процедур МММА використовувалось програмне забезпечення SAS Studio з написаними користувачькими модулями мовою С# у середовищі Microsoft Visual Studio 2017. Модулі відповідають окремим крокам МММА: побудова морфологічної таблиці; оцінювання морфологічної таблиці; оцінювання матриці взаємозв'язків; розрахунок ваг альтернатив параметрів для одноетапної та двоетапної процедур морфологічного аналізу. Така система дозволяє конструювати морфологічні дослідження для достатньо складних задач.

Розглянемо можливості цих модулів.

Модуль побудови морфологічної таблиці, головне вікно якого зображено на рис. 5.1:

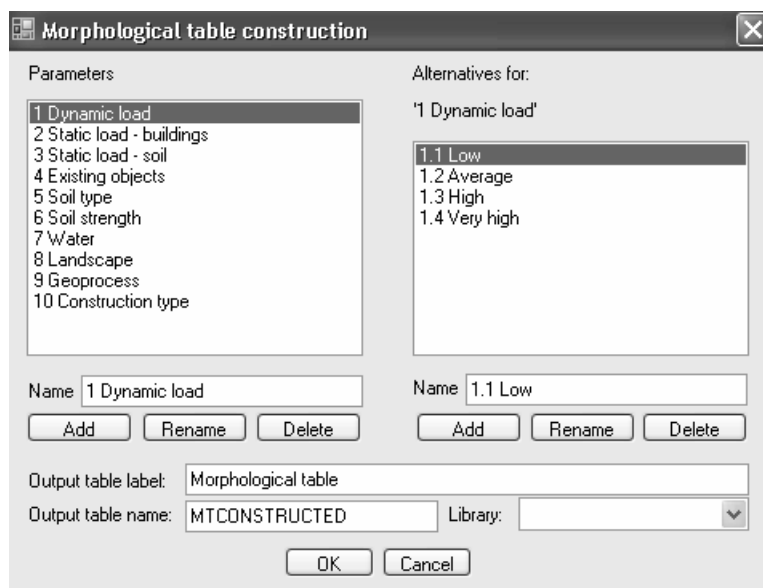


Рисунок 5.1 – Вікно налаштувань модулю побудови морфологічної таблиці

В цьому модулі задається перелік параметрів морфологічної таблиці і визначається набір альтернатив для кожної з них. Результатом роботи цього модулю є таблиця, що містить записи з наступними полями:

- *pid* – ідентифікатор параметра;
- *vid* – ідентифікатор альтернативи;

- *param* – назва параметра;
- *val* – назва альтернативи.

Модуль оцінювання морфологічної таблиці. Цей модуль приймає на вхід таблицю, створену попереднім модулем, і дозволяє її оцінити. Оцінки можуть бути задані як за допомогою випадального списку зі шкалою Міллера, так і задані вручну. Головне вікно цього модулю показано на рис. 5.2:

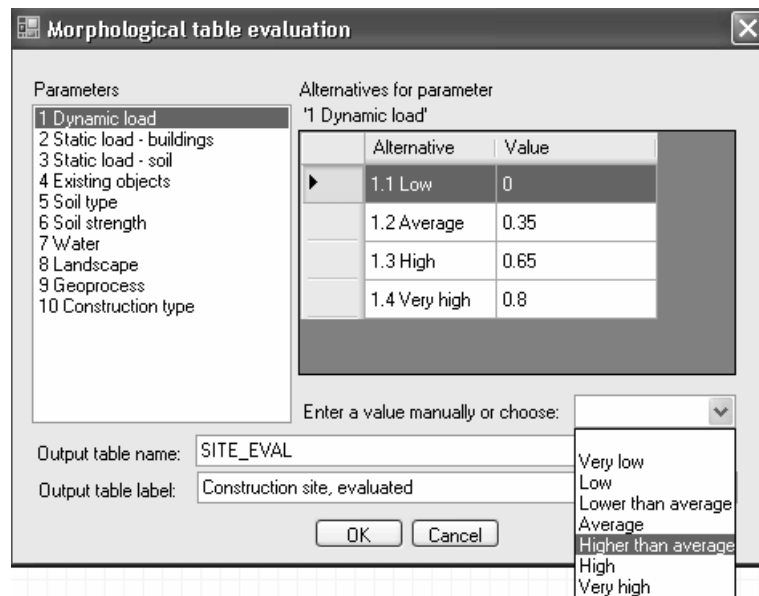


Рисунок 5.2 – Вікно налаштувань модулю оцінювання морфологічної таблиці
Результатом роботи цього модулю є таблиця, що містить наступні поля:

- *pid* – ідентифікатор параметра;
- *vid* – ідентифікатор альтернативи;
- *val* – оцінка альтернативи.

Зазначимо, що для однієї побудованої морфологічної таблиці можна зробити декілька оцінювань, створивши декілька дублікатів модулю з різними оцінками.

Модуль оцінювання матриці взаємозв'язків. Цей модуль приймає на вхід таблицю, створену модулем побудови морфологічної таблиці. В ньому обирається пара параметрів морфологічної таблиці, і для цієї пари відображається фрагмент матриці взаємозв'язків. Так само, як і в попередньому модулі, кожне значення цієї матриці можна задавати вручну або обирати з переліку варіантів, заданих словесним описом. Головне вікно цього модулю показано на рис. 5.3:

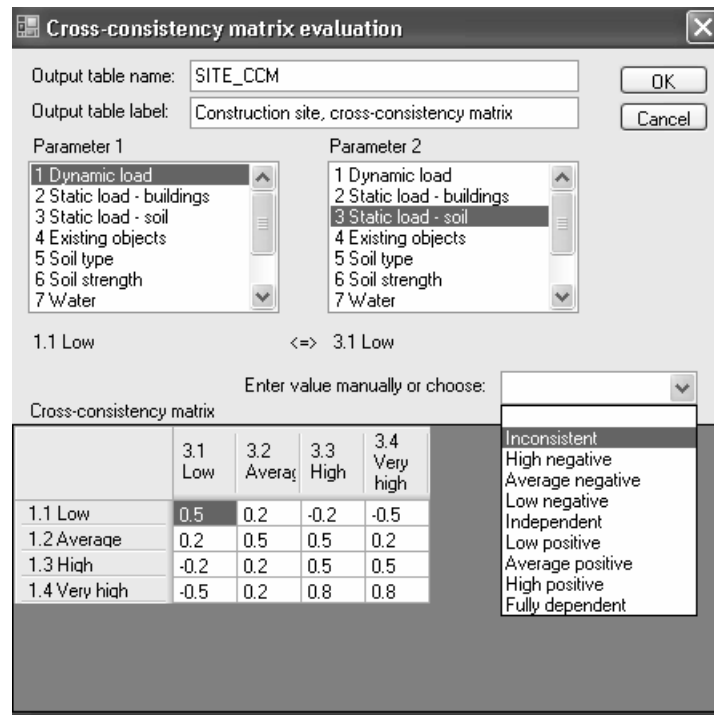


Рисунок 5.3 – Вікно налаштувань модулю оцінювання матриці взаємозв'язків
Результатом роботи цього модулю є таблиця, що містить наступні поля:

- *vid1* – ідентифікатор першої альтернативи в парі;
- *vid2* – ідентифікатор другої альтернативи в парі;
- *val* – оцінка матриці взаємозв'язків для цієї пари альтернатив.

Модуль розрахунку ваг альтернатив параметрів для одноетапної процедури МММА. Модуль приймає на вхід опис морфологічної таблиці, вхідні оцінки таблиці і матрицю взаємозв'язків, і проводить одноетапну процедуру МММА. Головне вікно модулю, в якому задаються вхідні таблиці, зображено на рис. 5.4:

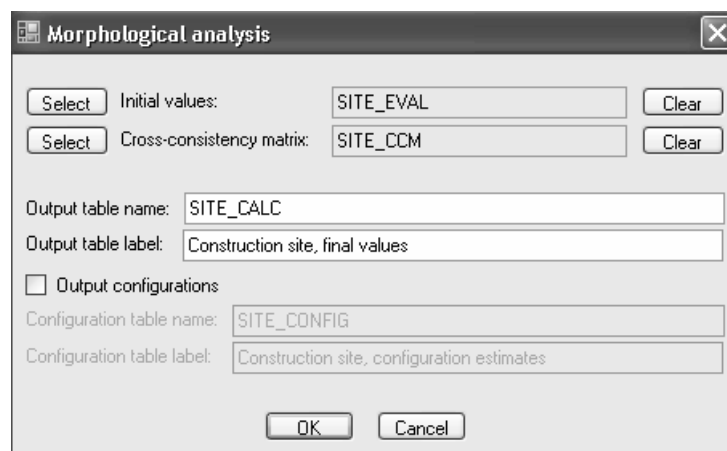


Рисунок 5.4 – Вікно налаштувань модулю одноетапної процедури МММА

Результатом роботи цього ж модулю є така ж з форматом таблиця, як і в модулі оцінювання матриці взаємозв'язків. Оцінки альтернатив параметрів в цій таблиці розраховані за одноетапною процедурою МММА.

Модуль виведення результатів. Цей модуль приймає на вхід опис морфологічної таблиці і одну або декілька таблиць з оцінками морфологічної таблиці, і представляє їх у зручному для користувача вигляді. Вивести дані можна як у вигляді звіту SAS, так і у вигляді html-файлу, який можна завантажити. Головне вікно модулю зображено на рис. 5.5:

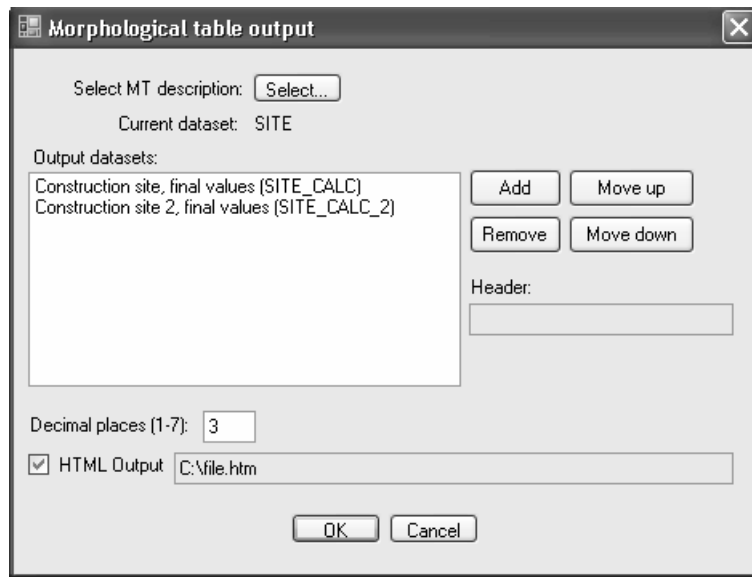


Рисунок 5.5 – Вікно налаштувань модулю виведення результатів

Результатом роботи цього модулю є вікно, що відображає таблицю з розрахованими ймовірностями альтернатив параметрів, як показано на рис. 5.6.

Construction site, final values																			
1 Dynamic load		2 Static load - buildings		3 Static load - soil		4 Existing objects		5 Soil type		6 Soil strength		7 Water		8 Landscape		9 Geoprocess		10 Construction type	
Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight
1.1 Low	0.000	2.1 Low	0.000	3.1 Low	0.030	4.1 None	0.000	5.1	0.107	6.1 Very strong	0.000	7.1 Far	0.000	8.1 Flat	0.476	9.1 None	0.018	10.1 Open	0.281
1.2 Average	0.368	2.2 Average	0.000	3.2 Average	0.717	4.2 Far	0.479	5.2	0.372	6.2 Strong	0.000	7.2 >3 >10	0.384	8.2 1-4 degrees	0.177	9.2 Stable	0.346	10.2 Underground	0.719
1.3 High	0.286	2.3 High	0.000	3.3 High	0.189	4.3 Average	0.521	5.3	0.434	6.3 Average	0.352	7.3 <3 >10	0.552	8.3 4-6 degrees	0.275	9.3 Slight	0.559		
1.4 Very high	0.326	2.4 Very high	1.000	3.4 Very high	0.063	4.4 Near	0.000	5.4	0.087	6.4 Weak	0.648	7.4 Near	0.065	8.4 >8 degrees	0.072	9.4 Significant	0.077		
Page Break																			
Construction site 2, final values																			
Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight	Alternative	Weight
1.1 Low	0.707	2.1 Low	0.000	3.1 Low	0.324	4.1 None	0.714	5.1	0.170	6.1 Very strong	0.000	7.1 Far	0.098	8.1 Flat	0.000	9.1 None	0.000	10.1 Open	0.634
1.2 Average	0.263	2.2 Average	1.000	3.2 Average	0.639	4.2 Far	0.286	5.2	0.450	6.2 Strong	0.209	7.2 >3 >10	0.672	8.2 1-4 degrees	0.382	9.2 Stable	0.507	10.2 Underground	0.366
1.3 High	0.029	2.3 High	0.000	3.3 High	0.025	4.3 Average	0.000	5.3	0.342	6.3 Average	0.670	7.3 <3 >10	0.126	8.3 4-6 degrees	0.476	9.3 Slight	0.467		
1.4 Very high	0.000	2.4 Very high	0.000	3.4 Very high	0.012	4.4 Near	0.000	5.4	0.036	6.4 Weak	0.120	7.4 Near	0.104	8.4 >8 degrees	0.142	9.4 Significant	0.025		
Page Break																			

Рисунок 5.6 – Вигляд таблиць розрахованих ймовірностей альтернатив параметрів

Модуль виведення результатів дозволяє співставити оцінки декількох морфологічних таблиць, наприклад, вхідні і результуючі оцінки, або оцінки двох різних об'єктів.

Модуль оцінювання матриці зв'язків. Цей модуль подібний до модуля оцінювання матриці взаємозв'язків, за виключенням того, що його входом мають бути дві різних морфологічних таблиці. Відповідно, для оцінювання фрагменту матриці обираються параметри різних морфологічних таблиць. Головне вікно модулю зображено на рис. 5.7:

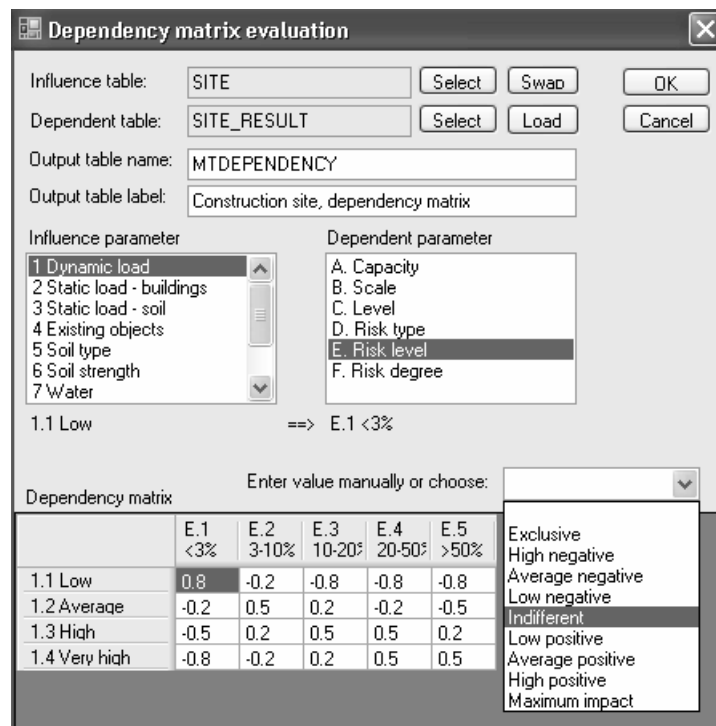


Рисунок 5.7 – Вікно налаштувань модулю оцінювання матриці зв'язків

Результуюча таблиця аналогічна до таблиці з оцінками матриці взаємозв'язків з відповідного модулю.

Модуль розрахунку ваг альтернатив параметрів для одноетапної процедури МММА. Модуль імплементує двоетапну процедуру МММА []. Його входом є: описи морфологічних таблиць першого та другого етапів, вхідні оцінки цих таблиць, матриця взаємозв'язків для першого етапу, і матриця зв'язків для другого. Головне вікно модулю, в якому задаються вхідні таблиці, зображено на рис. 5.8:

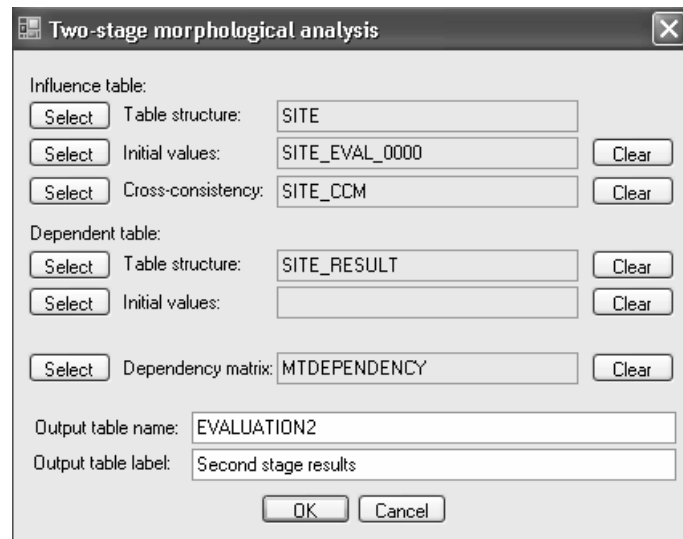


Рисунок 5.8 – Вікно налаштувань модулю двоетапної процедури МММА

Результатом є стандартна таблиця оцінок для другої (залежної) морфологічної таблиці. Переглянути ці оцінки у зручному вигляді можна за допомогою описаного раніше модулю виведення результатів.

Із перелічених вхідних даних обов'язковими є тільки описи двох морфологічних таблиць. Інші вхідні дані у разі відсутності обираються за замовчуванням (рівномірно розподілені вхідні ймовірності або нульові матриці зв'язків).

Із створених модулів можна будувати моделі для достатньо складних задач. Наприклад, модуль розв'язання задачі оцінювання ділянок для підземного будівництва (розд. 6), наведено на рис. 5.9.

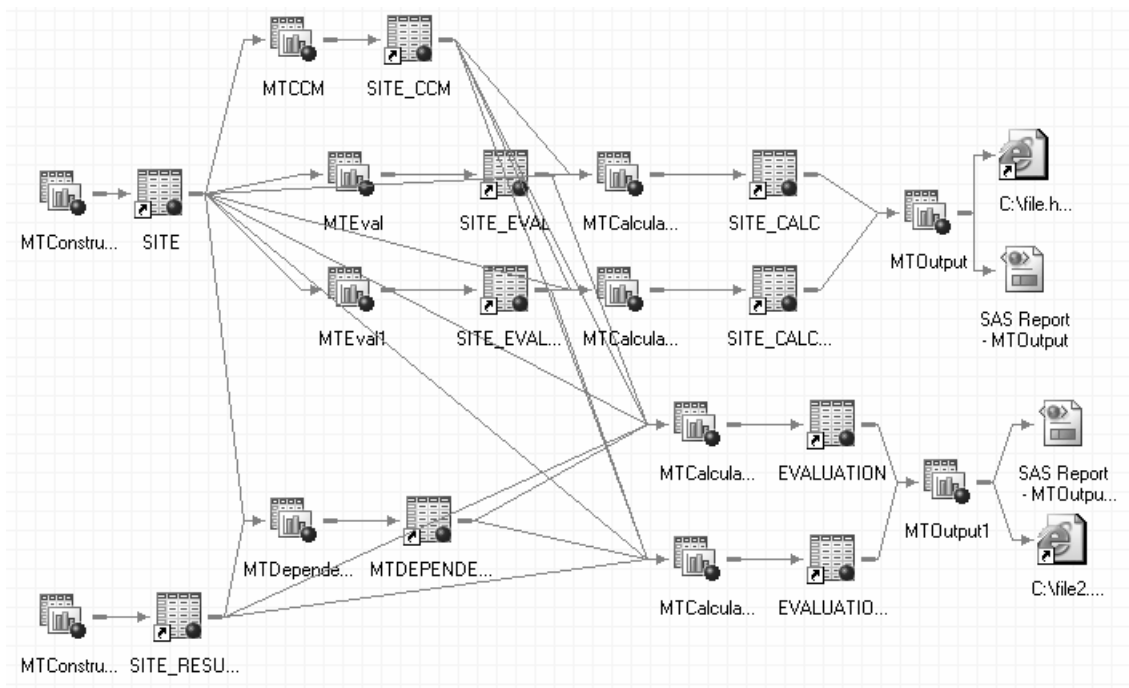


Рисунок 5.9 – Приклад моделі на основі розроблених модулів

На рис. 5.9 верхня частина відповідає першому етапу МММА, в якому оцінюються дві ділянки. Відповідно, два різних набори оцінок задаються двома наборами модулів для оцінювання і розрахунку, які потім зводяться в одну таблицю в модулі виведення результатів. Нижня частина рисунку відповідає другому етапу МММА, для двох ділянок задані два модулі розрахунку, результати яких знову зводяться в одну таблицю для порівняння оцінок рішень щодо ділянок.

Таким чином, створений інструментарій є дуже гнучким, дозволяючи моделювати складні задачі і отримувати підтримку прийняття рішень щодо них, використовуючи МММА.

На створене програмне забезпечення оформлено авторське свідоцтво [164].

Висновки за розділом 5

1. Розроблене програмне забезпечення на базі SAS Studio з користувацькими модулями мовою C#, які відповідають базовим крокам МММА: конструювання МТ; оцінювання МТ; оцінювання МВЗАП; оцінювання МЗАП; розрахунок оцінок

альтернатив параметрів для одноетапної та двоетапної процедур морфологічного аналізу; виведення і візуалізація результатів.

2. Формат розробленого програмного забезпечення дозволяє компонувати модулі у різних конфігураціях для розв'язання задач різної природи і складності.

РОЗДІЛ 6

ПОБУДОВА ІНСТРУМЕНТАРІЮ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ПРОБЛЕМ ОСВОЄННЯ ПІДЗЕМНОГО ПРОСТОРУ МЕГАПОЛІСІВ

6.1 Розробка стратегії використання різних процедур модифікованого методу морфологічного аналізу в процесі сценарного аналізу

В процесі сценарного аналізу важливим є правильний вибір і організація процедур застосування методів якісного аналізу. Результативність МММА також досягається в першу чергу за рахунок коректного використання наявних інструментів морфологічного дослідження, описаних в розділах 2–4. В табл. 6.1 наведені типові задачі системного аналізу, для яких доцільно застосовувати відповідні процедури МММА.

Таблиця 6.1 – Задачі і відповідні інструменти морфологічного дослідження

Задача	Інструмент морфологічного моделювання
Опис, побудова моделі, дослідження деякого класу об'єктів, процесів, подій або явищ з наявністю факторів невизначеності; визначення його критичних параметрів	Одноетапна процедура МММА
Прийняття рішень в умовах сукупності потенційних описів об'єктів, процесів, подій або явищ, або в умовах неможливості отримати повну і точну інформацію про характеристики такого об'єкта	Двоетапна процедура МММА
Дослідження і прийняття рішень для систем, в які входять декілька внутрішніх і зовнішніх об'єктів (подій, процесів, явищ), що характеризуються невизначеністю; між об'єктами можуть бути зв'язки різного типу	Мережі морфологічних таблиць
Дослідження і прийняття рішень в складних задачах, які розкладаються на підзадачі; синтез складних рішень, які включають в себе прийняття рішень щодо декількох пов'язаних об'єктів	Ієрархічні морфологічні таблиці з агрегуванням груп конфігурацій.

Зазначимо, що в ході будь-якого морфологічного дослідження створюється дві групи наборів даних:

- описи морфологічних таблиць і матриці взаємозв'язків або зв'язків – ці дані описують наявні знання про об'єкт(и) дослідження і притаманні їм

зв'язки. Ця інформація мало змінюється з часом, тому може бути використана в наступних дослідженнях для опису ситуацій того ж класу. Сукупність описів і морфологічних таблиць, по суті, задає модель відповідного об'єкта дослідження, і може бути використана в основі або як допоміжний інструмент системи підтримки прийняття рішень;

- вхідні оцінки морфологічних таблиць, які описують конкретний об'єкт або ситуацію, і містять інформацію лише про окремий географічний або часовий зріз, який цікавить дослідника. Оскільки отримання набору вхідних оцінок є достатньо швидкою процедурою, МММА може застосовуватись для оперативного аналізу при наявності попередньо побудованих морфологічних таблиць і матриць взаємозв'язків/зв'язків.

Хоча різноманіття можливих задач, пов'язаних із застосування МММА дуже велике, в цілому способи роботи з морфологічними моделями можна звести до трьох випадків:

1) оцінювання підготовленості. Оцінюються ймовірності параметрів об'єкта дослідження для того, щоб розрахувати очікувані результативності рішень щодо всієї множини потенційних конфігурацій об'єкта (тобто варіантів перебігу події, параметрів деякого процесу тощо). Це дозволяє виділити найбільш критичні альтернативи параметрів, за яких буде заподіяно найбільшої шкоди, або підготовленість до яких є найнижчою; оцінити альтернативи рішень і обрати найбільш пріоритетні, які максимально сприятливо вплинуть на ситуацію з об'єктом дослідження;

2) моніторинг. Цей спосіб є доцільним, коли поведінку і характеристики об'єкта доцільно спостерігати протягом тривалого часу. В цьому режимі доцільно використовувати автоматизовані інструменти оцінювання морфологічних таблиць, зокрема, на основі збору і класифікації текстових даних. Оцінки альтернатив параметрів періодично перераховуються, і можна отримати раннє попередження при досягненні певними оцінками критичних значень, завчасно виявляючи несприятливі і потенційно катастрофічні ситуації;

3) реакція. Мета – розрахувати результативність заходів реакції на конкретну ситуацію, яка виникла, або на межі виникнення. В такому випадку частину альтернатив параметрів можна зафіксувати відповідно до ситуації, яка склалася, і проаналізувати можливі наслідки та оцінити альтернативи рішень, які доцільно приймати щодо конкретних обставин. Цей режим найбільш корисний для оперативного прийняття рішення і синтезу стратегії реакції щодо небажаних подій.

В табл. 6.2 наведені етапи морфологічного дослідження, можливі альтернативні способи їх виконання і засоби аналізу.

Таблиця 6.2 – Етапи морфологічного дослідження, способи виконання, засоби аналізу

Етап	Способи виконання	Засоби аналізу
Побудова морфологічних таблиць	- Збір даних від експертів - Автоматизована генерація таблиць на основі бази знань	- Інтуїтивний аналіз правильності побудови морфологічних таблиць
Заповнення матриці (матриць) взаємозв'язків або зв'язків	- Експертне оцінювання - Генерація на основі даних текстової аналітики	- Аналіз протиріч у матриці взаємозв'язків - Оцінювання упередженості моделі
Отримання вхідних даних	- Безпосереднє експертне оцінювання - Експертне оцінювання парними порівняннями - Генерація на основі даних текстової аналітики	- Аналіз повноти отриманих даних
Розрахунок результату	- МММА на основі розрахунку власного вектору - МММА з альтернативним урахуванням матриці взаємозв'язків - МММА з фіксованими параметрами	- Оцінювання чутливості до вхідних даних - Аналіз впливу вхідних даних на результат

Розглянемо детальніше етапи дослідження і процедури, які виконуються в рамках етапів.

6.1.1 Побудова морфологічних таблиць

Морфологічні таблиці будує аналітик, зокрема на основі консультацій з експертами в галузі і вивчення нормативних документів. Детальніше особливості побудови морфологічних таблиць, типові параметри і вимоги до них

висвітлюються в розд. 3.1.1. При наявній побудованій Базі знань [152] з'являється можливість будувати морфологічні таблиці напівавтоматизовано, з використанням семантичних мереж для виділення параметрів і альтернатив об'єкта.

Враховуючи, що побудова морфологічних таблиць є евристичним процесом, результат якого представляється у вербальному вигляді, точних процедур аналізу адекватності побудованих таблиць не існує, однак перед оцінюванням варто провести інтуїтивний аналіз побудованих таблиць, відповівши на ряд питань:

– чи відповідають параметри морфологічних таблиць вимогам релевантності, взаємовиключності і повноти множини альтернатив?

– чи може будь-яка з мислимих релевантних конфігурацій об'єкта бути співставленою з однією з конфігурацій морфологічних таблиць? Якщо ні, потрібно розширити множину альтернатив одного або декількох параметрів (можливо, ввести допоміжну альтернативу «Інше»), щоб охопити якомога більшу множину потенційних конфігурацій;

– чи можуть існувати дві принципово різні конфігурації об'єкта, яким співставляється однакова конфігурація морфологічної таблиці? Якщо так, потрібно або а) розбити одну з альтернатив, що входять до цієї конфігурації, на дві, які будуть відображати різницю у варіантах об'єкта; або б) ввести ще один характеристичний параметр, альтернативи якого розрізнятимуть ці дві конфігурації;

– чи є альтернативи, які здійснюють приблизно однаковий вплив на всі інші параметри? Такі альтернативи бажано об'єднувати, або переформулювати відповідний параметр для зменшення навантаження на експертів;

– чи однаково розуміють аналітик і експерт(и) формулювання назв альтернатив і параметрів морфологічних таблиць?

Після затвердження морфологічних таблиць наступним кроком є побудова на їх основі опитувальних форм, після яких можна переходити до наступних етапів.

6.1.2 Заповнення матриць зв'язків

Матриці взаємозв'язків і зв'язків є ключовими для морфологічної моделі; також вони потребують суттєвого навантаження на експертів, оскільки загальна кількість питань для морфологічної таблиці, яка містить N параметрів, кожний з яких має $n_i, i \in \overline{1, N}$ альтернатив, складає $\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N n_i n_j$. Для зменшення розмірів опитувальної форми бажано попередньо провести аналіз пов'язаності параметрів, і виключити блоки питань, що відповідають очевидно незалежним параметрам.

Заповнення матриць взаємозв'язків і зв'язків можливе на основі проведеної класифікації великих масивів текстових даних щодо області дослідження (див. підрозділ 3.2), однак такі дані можуть містити суттєві помилки або викривлення, тому їх доцільно використовувати як базові оцінки, які потім можуть бути уточнені шляхом експертної оцінки.

Заповнену матрицю взаємозв'язків необхідно перевірити на протиріччя за допомогою процедури, наведеної в підрозділі 2.3. У випадку виявлення протиріччя важливо усвідомити фактор, який їх викликав:

- якщо протиріччя викликані помилкою експерта, необхідно провести повторне оцінювання пар параметрів, для яких протиріччя виникло;
- якщо протиріччя викликані нерозумінням експертом назв параметрів і альтернатив, потрібно зробити відповідні корекції, щоб розуміння сутностей, що входять до таблиці, було однаковим у експерта і аналітика.

6.1.3 Отримання вхідних даних

Введення вхідних даних морфологічної моделі, тобто оцінок альтернатив параметрів морфологічної таблиці, задає конкретну ситуацію щодо об'єкта дослідження. Такі оцінки доцільно отримувати за допомогою опитувальної форми для експерта (кількість питань відносно невелика, і складає $\sum_{i=1}^N n_i$); також деякі

параметри може бути зручно оцінювати на основі результатів класифікації і категоризації масиву текстів (наприклад, новин) щодо об'єкта дослідження, як це показано в підрозділі 3.2.

В разі використання опитувальних форм можна застосовувати як безпосереднє оцінювання ймовірності, так і оцінювання парними порівняннями [166] з використанням відповідних методів обробки матриць парних порівнянь.

Для отриманих оцінок можна проаналізувати повноту множини альтернатив параметрів (підрозділ 2.2). В разі виявлення значень за межами порогових може виникнути необхідність повернення до етапу побудови морфологічної таблиці з метою розширення множини альтернатив тих параметрів, де спостерігається суттєва неповнота.

6.1.4 Розрахунок результату

Для розрахунку результату рекомендується в першу чергу використовувати підхід на основі розрахунку власного вектору, описаний в підрозд. 2.1, для якого існують добре розроблені алгоритми і процедури, які також імплементовані у вигляді програмного забезпечення (розділ 5).

Після отримання результатів бажано проконсультуватись з експертом для оцінки відповідності результатів уявленням експерта. В разі, якщо експерт вважає деякі оцінки такими, що занадто відхиляються від його думки, можна провести аналіз впливу вхідних даних на результат за процедурою, описаною в п. 2.1.7, щоб виявити оцінки, які в найбільшій мірі спричинили появу такого результату. Якщо експерт вважає ці оцінки правильними, поява неочікуваного результату може бути спричиненою процедурою розрахунку результату; в такому разі можна спробувати застосувати альтернативну процедуру врахування матриці взаємозв'язків, описану в підрозділі 2.7, оскільки деякі набори значень матриці взаємозв'язків можуть виявитись занадто чутливими до від'ємних значень при використанні стандартної процедури розрахунку.

Для перевірки стійкості ранжування можна застосувати процедуру аналізу чутливості, описану в п. 2.1. Якщо деякі пари альтернатив виявляються занадто чутливими до зміни вхідних даних, можливо, треба використати більш точні процедури отримання вхідних даних – наприклад, застосування парних порівнянь замість безпосереднього оцінювання.

6.2 Врахування інженерно-геологічних факторів у прийнятті рішень щодо підземного будівництва

Базовою задачею для інструментарію освоєння підземного простору мегаполісів є задача оцінювання ділянки (об'єму) щодо придатності для підземного будівництва на передпроектній стадії будівництва, з урахуванням ряду інженерно-геологічних факторів. На етапі вибору ділянки для будівництва може бути економічно недоцільним проведення повного комплексу інженерних або геологічних робіт і детальних вимірювань, тому в цій задачі доводиться оперувати вхідними даними з присутніми факторами невизначеності, які полягають в тому, що:

- 1) на цьому етапі можуть бути невідомі точні характеристики геологічного середовища;
- 2) більшість ділянок є гетерогенними за своєю структурою і мають змінні у часі і просторі характеристики.

Через ці фактори МММА є раціональним вибором серед методів якісного аналізу для цієї задачі, оскільки ділянка потенційного будівництва є об'єктом, що може мати одну з великої кількості конфігурацій, які доцільно обробляти за допомогою морфологічного дослідження, залучаючи експертів, які можуть приймати рішення, базуючись на досвіді, інтуїції і відносно невеликій кількості наявної інформації про ділянку.

Таким чином, метою дослідження стала побудова інструментарію оцінювання придатності деякої ділянки для підземного будівництва на основі інженерно-геологічних факторів, враховуючи притаманні ділянці ризики, що

формалізує і супроводжує процес прийняття рішення щодо використання земельної ділянки, зменшує вірогідність помилки через неврахування певних факторів або особливостей, надає інформацію для прийняття рішення у зручній формі таблиць, діаграм або графіків.

Була побудована морфологічна модель для двоетапної процедури МММА, в якій на першому етапі розглядалась ділянка потенційного будівництва, а на другому – рішення і потенційні ризики, пов'язані із цією ділянкою.

За допомогою експертів з підземного будівництва було сформовано перелік параметрів і характеристик, які впливають на прийняття рішення щодо ділянки. Однак кількість цих параметрів занадто велика для зручного аналізу, тому деякі набори характеристик, які мають схожий вплив на рішення, були агреговані в окремі параметри. Таким чином, було сформульовано 10 характеристичних параметрів для МТ першого етапу:

- 1) рівень динамічного навантаження;
- 2) показник статичного навантаження від поверхневої забудови;
- 3) показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву;
- 4) вплив існуючих підземних об'єктів;
- 5) генетичний тип та літологічний склад ґрунтів;
- 6) розрахунковий опір ґрунту;
- 7) вплив водоносних горизонтів і верховодки;
- 8) тип рельєфу і морфометрія;
- 9) інженерно-геологічні процеси;
- 10) геотехнології будівництва підземних споруд.

В цьому наборі присутні

– параметри, що описують загрози надійності споруди, пов'язані зі впливами динамічних навантажень, зокрема транспорту, роботи промислових підприємств (параметр 1); тиском від поверхневої забудови і ґрунтового масиву (параметри 2–3); наявності сусідніх підземних об'єктів (параметр 4); потенційно недостатньої міцності ґрунту (параметр 6);

– параметри, що впливають на вартість і час будівництва, необхідність захисту від зовнішніх впливів і наявність ризиків у експлуатації підземної споруди (параметри 5, 7, 8, 9).

У вигляді МТ ці параметри показані в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Морфологічна таблиця інженерно-геологічних факторів ділянки потенційного підземного будівництва

Параметр	Альтернативи параметра
1. Рівень динамічного навантаження	1.1. Низький (46 – 53 дБ)
	1.2. Середній (53 – 73 дБ)
	1.3. Підвищений (73 – 96 дБ)
	1.4. Високий (більше 96 дБ)
2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови	2.1. Незначний ($K_{ст} < 1$)
	2.2. Помірний ($1 < K_{ст} < 2$)
	2.3. Відносно високий ($2 < K_{ст} < 3,5$)
	2.4. Високий ($K_{ст} > 3,5$)
3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву	3.1. Незначний ($K_{мас} < 0,05$, Мпа)
	3.2. Помірний ($0,05 < K_{мас} < 0,3$, Мпа)
	3.3. Високий ($0,3 < K_{мас} < 0,5$, Мпа)
	3.4. Вельми високий ($K_{мас} > 0,5$, Мпа)
4. Вплив існуючих підземних об'єктів	4.1. Відсутній (відстань понад 50 м)
	4.2. Незначний (відстань 20 – 50 м)
	4.3. Впливовий (відстань 10 – 20 м)
	4.4. Загрозливий (відстань ближче 10 м)
5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів	5.1. Невивітрили глини та піски середньої щільності
	5.2. Техногенні відклади (наживні та насипні ущільнені різновиди)
	5.3. Делювіальні глинисті ґрунти (водонасичені), обводнені надзаплавні піски
	5.4. Просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул)
6. Розрахунковий опір ґрунту	6.1. Дуже міцні ґрунтові основи > 300 кПа
	6.2. Міцні 200-300 кПа
	6.3. Ґрунти середньої міцності 150-200 кПа
	6.4. Відносно міцні ґрунти < 150 кПа
7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки	7.1. Водоносні горизонти у Р- N_{1np}
	7.2. Глибина залягання ґрунтових вод > 3 м, напірних > 10 м
	7.3. Глибина залягання ґрунтових вод < 3 м, напірних < 10 м
	7.4. Наявні підтоплені ділянки з РГВ до 1м
8. Тип рельєфу і морфометрія	8.1. Плaskі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини (нахил поверхні до 1°)
	8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів (нахил поверхні $1-4^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $0-2$ км/км ²)
	8.3. Долини малих річок, слабко розчленовані схили, висока заплава (нахил поверхні $4-8^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $2-3$ км/км ²)
	8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава (нахил поверхні $> 8^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $3-4$ км/км ²)
9. Інженерно-геологічні процеси	9.1. Відсутні
	9.2. Процеси застабілізовані
	9.3. Прояв зсувних зміщень незначних об'ємів
	9.4. Активний прояв просідання, підтоплення, гравітаційних процесів
10. Геотехнології будівництва підземних споруд	10.1. Відкриті
	10.2. Підземні

МТ другого етапу містить 6 параметрів, пов'язаних із елементами рішення щодо ділянки (параметри А–С), і характеристиками ризиків для забудови на цій ділянці (параметри D–F):

- А. Придатність ділянки (придатна; непридатна). Цей параметр описує узагальнене рішення щодо сприятливості підземному будівництву;
- В. Масштаб об'єкта (площа перерізу до 10 м²; площа перерізу до 35 м²; площа перерізу до 70 м²; площа перерізу до і більше 70 м²). Альтернативи параметра відповідають різним класам підземних споруд: інженерні комунікації (В.1), тунелі і переходи (В.2), підземні споруди камерного типу малих перерізів (В.3), і підземні споруди камерного типу великих перерізів (В.4) – ТРЦ, підприємства тощо;
- С. Рівень забудови (0–10 м; 10–20 м; 20–50 м; глибше 50 м);
- D. Фактор ризику (відмова конструкцій, порушення функціональності; небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти; ініціація зсувних явищ; підтоплення; екологічні ризики; транспортні проблеми; зростання вартості будівництва та експлуатації споруд);
- Е. Ступінь ризику (<3%; 3–10%; 10–20%; 20–50%; >50%);
- F. Рівень ризику (0,1–5% Q; 5–20% Q; 20–50% Q; >50% Q). Тут Q – вартість об'єкта.

Вигляд МТ показаний в табл. 6.4.

Далі була сформована модель за допомогою заповнення експертами МВЗАП і МЗАП на основі опитувальних форм щодо зв'язків між альтернативами МТ першого етапу, і впливу альтернатив МТ першого етапу на МТ другого етапу. Форма питань і шкала переведення в числову форму використовувалась стандартна для МММА. Заповнена МВЗАП наведена в табл. 6.5.

Таблиця 6.4 – Морфологічна таблиця рішення щодо ділянки будівництва

Загальна характеристика		
А. Придатність ділянки	В. Масштаб об'єкту	С. Глибина забудови
А.1. Придатна	В.1. Площа перерізу до 10 м ²	С.1. 0–10 м
А.2. Непридатна	В.2. Площа перерізу до 35 м ²	С.2. 10–20 м
	В.3. Площа перерізу до 70 м ²	С.3. 20–50 м
	В.4. Площа перерізу до і більше 70 м ²	С.4. глибше 50 м
Ризики для забудови		
Д. Фактор ризику	Е. Ступінь ризику	Ф. Рівень ризику
Д.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності та безпеки підземних споруд	Е.1. <3%	Ф.1. 0,1–5% Q
Д.2. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти	Е.2. 3–10%	Ф.2. 5–20% Q
Д.3. Ініціація зсувних явищ	Е.3. 10–20%	Ф.3. 20–50%Q
Д.4. Підтоплення	Е.4. 20–50%	Ф.4. >50% Q
Д.5. Екологічні ризики	Е.5. >50%	
Д.6. Транспортні проблеми		
Д.7. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд		

Таблиця 6.5 – Матриця взаємозв'язків альтернатив параметрів інженерно-геологічного середовища ділянки

	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	4.4	5.1	5.2	5.3	5.4	6.1	6.2	6.3	6.4	7.1	7.2	7.3	7.4	8.1	8.2	8.3	8.4	9.1	9.2	9.3	9.4	10.1	10.2	
1.1	0,5	0,2	-2	-5	0,8	0,5	-2	-5																	0,8	0,5	-2	-8			
1.2	0,2	0,5	0,5	0,2	-2	0,2	0,5	0,2																	-5	0,2	0,8	0,5			
1.3	-2	0,2	0,5	0,5	-8	-5	0,5	0,8																	-8	-5	0,8	0,8			
1.4	-5	0,2	0,8	0,8	-8	-5	0,5	0,8																	-8	-5	0,5	0,8			
2.1	0,8	0,2											-5	-2	0,2	0,5			0,2	0,8					0,8	0,5	-5	-8	0,8	-5	
2.2	0,2	0,5											-2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	-2					0,2	0,5	0,5	-5	0,5	-2	
2.3	-2	0,5	0,2	0,2									0,5	0,8	0,2	-2	0,5	0,2	-2	-5					-2	0,2	0,5	0,5	-5	0,5	
2.4	-8	0,2	0,5	0,5									0,8	0,5	-2	-5	0,8	0,5	-2	-8					-2	0,2	0,5	0,8	-5	0,8	
3.1					0,5	0,5	-2	-5	0,8	0,35	-5	-8	-5	-5	0,2	0,5	-5	-2	0,2	0,8	-5	-2	0,2	0,8	-5	-2	0,5	0,8	0,8	-5	
3.2						0,2	0,5	-2	0,5	0,2	-2	-5	-2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	-2	0,5	0,5	-2	-5	0,2	0,5	0,5	-2	0,5	-2	
3.3					-5	-2	0,5	0,5	-5	-2	0,5	0,5	0,5	0,2	-2	-5	0,8	0,5	-2	-8	0,8	0,5	0,2	-8	0,8	0,5	-2	-8	-2	0,5	
3.4					-5	-2	0,5	0,8	-8	-2	0,5	0,8	0,8	0,5	-2	-5	0,8	0,5	-5	-8	0,8	0,5	-5	-8	0,8	0,5	-5	-8	-5	0,8	
4.1																		0,2	0,2	0,5					0,8	0,5	-2	-5			
4.2																		0,5	0,5	-2	-5				0,5	0,5	0,2	-2	0,2	-2	
4.3																		-2	0,2	0,5	0,5				-2	0,2	0,5	0,5	0,2	-2	
4.4																									-5	-2	0,2	0,5	0,5	-5	
5.1													0,8	0,5	0,2	-5	0,5	0,2	-2	-5	0,8	0,5	-5	-8	0,8	0,5	0,2	-5			
5.2													-5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	-2	-5	0,5	0,2	-2	-5	0,5	0,2	-2	-5			
5.3													-5	-2	0,2	0,5	-5	-2	0,5	0,8	-5	-2	0,5	0,5	-5	-2	0,2	0,5			
5.4													-1	-8	0,2	0,8	-5	-2	0,2	0,8	-5	-2	0,5	0,8	-8	-2	0,5	0,8			
6.1																															
6.2																															
6.3																															
6.4																															
7.1																										0,5	0,5	-2	-5		
7.2																										0,5	0,2	-2	-5		
7.3																										-5	-2	0,2	0,5		
7.4																										-8	-5	0,5	0,8		
8.1																										0,8	0,5	-5	-8	0,8	-2
8.2																										0,5	0,2	-2	-5	0,5	0,2
8.3																										-5	-2	0,5	0,5	-5	0,5
8.4																										-1	-8	0,5	0,8	-8	0,2

Варто зазначити, що оскільки не всі параметри прямо взаємопов'язані, попередньо був проведений аналіз наявності зв'язків між ними, і для незалежних пар параметрів питання експертам не ставились. Таким парам параметрів відповідають порожні блоки клітинок в табл. 6.5.

Аналогічно за допомогою експертного оцінювання була отримана МЗАП, що поєднує перший і другий етап (табл. 6.6).

Таблиця 6.6 – Матриця зв'язків альтернатив параметрів МТ першого і другого етапу

	A.1	A.2	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	C.2	C.3	C.4	D.1	D.2	D.3	D.4	D.5	D.6	D.7	E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	F.1	F.2	F.3	F.4	
1.1	0,5	-0,5					0,5	0,2			-0,8	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,8	-0,2	-0,8	-0,8	-0,8	0,5	-0,5	-0,8	-1	
1.2	0,2	-0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,5	0,2	0,2	-0,5	-0,5	
1.3	-0,2	0,2	0,2	0,2	-0,5	-0,8	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,2	0,2	0,5	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	-0,2	0,5	0,2	0,2	
1.4	-0,8	0,8	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-0,5	0,5	0,8	0,5	0,5	0,8	0,2	0,2	0,5	0,5	-0,8	-0,2	0,2	0,5	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,5	
2.1	0,5	-0,8		0,2	0,5	0,5	0,8	0,5	0,2		-0,8	-0,8	-0,5	-0,5	-0,5	-0,8	-0,8	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,5	0,8	-0,2	-0,5	-0,8	
2.2	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2		-0,5	-0,5	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,5	0,2	-0,5	-0,5	0,2	0,2	-0,2	-0,5	
2.3	0,2	-0,2	0,5	0,2	0,2	-0,2	-0,5	-0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	-0,5	0,2	0,5	0,2	0,2	-0,5	0,2	0,2	0,2	
2.4	-0,2	0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	-0,5	-0,2	0,5	0,5	0,5	0,8	0,5	0,5	0,8	0,5	-0,5	-0,2	0,2	0,5	0,5	-0,8	0,2	0,5	0,5	
3.1	1	-0,8	0,2	0,5	0,5	0,8	0,8	0,5	-0,2	-0,5	-1	-0,8				-0,8	-0,8	1	0,5	-0,5	-0,8	-1	1	-0,5	-0,8	-1	
3.2	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	-0,2	0,2	0,5	0,2	-0,5	-0,5	0,2			0,2	0,2	0,5	0,5	-0,2	-0,5	-0,8	0,5	0,2	-0,5	-0,8	
3.3	-0,2	0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	-0,2	0,5	0,8	0,5	0,5	0,2			0,5	0,8	-0,5	-0,2	0,2	0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,2	
3.4	-0,5	0,5	0,5	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-0,5	0,2	0,8	0,8	-0,5	0,5			0,5	0,8	-1	-0,5	0,5	0,8	0,8	-0,8	0,5	0,8	0,8	
4.1	0,5	-0,8	0,2	0,2	0,5	0,5					-0,8	-0,8				-0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	
4.2	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5	-0,5			-0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	0,2	-0,5	-0,5	-0,5	
4.3	0,2	-0,2	0,2	-0,2	-0,2	-0,5	0,5	0,2	-0,2	-0,5	0,2	0,2	0,2			0,2	0,2	-0,2	0,5	0,2	0,2	0,2	-0,2	0,5	0,2	0,2	
4.4	-0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,8	0,5			0,5	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,8	0,8	-0,5	0,2	0,5	0,5	
5.1	0,8	-1	0,2	0,2	0,5	0,5	-0,2	0,2	0,5	0,5	-0,8	-0,8	-0,5	-0,5	-0,2	-0,5	-0,5	0,8	0,2	-0,5	-0,8	-0,8	0,8	-0,2	-0,5	-0,8	
5.2	0,5	-0,8	0,5	0,2	0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,5	0,5	-0,2	-0,5	-0,5	
5.3	-0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,5	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,5	
5.4	-0,5	0,5	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8	-0,8	-0,2	0,2	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,5	0,7	0,8	-0,8	-0,2	0,2	0,5	0,8	-0,8	0,2	0,5	0,8	
6.1	0,8	-0,8	0,2	0,5	0,8	0,8	-0,5	-0,2	0,5	0,5	-1	-0,8	-0,8	-0,5	-0,5	-0,5	-0,8	0,8	0,2	-0,5	-0,8	-1	1	-0,5	-0,8	-1	
6.2	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	-0,2	0,2	0,2	0,5	-0,8	-0,5	-0,5	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,5	0,8	0,2	-0,5	-0,8	
6.3	0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,5	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,2	-0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	-0,5	0,5	0,2	0,2	
6.4	-0,5	0,2	0,2	0,2	-0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,5	-0,8	0,5	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,5	-0,8	-0,2	0,2	0,5	0,8	-0,8	0,2	0,5	0,8	
7.1	0,8	-0,8	0,2	0,5	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,8	-0,5	-0,5	-0,5	0,8	0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-0,8	-0,2	-0,5	-0,8	
7.2	0,5	-0,5	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5	-0,2	-0,5	-0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,2	-0,5	0,2	0,2	-0,5	-0,5	
7.3	-0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	-0,2	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	-0,5	0,2	0,5	0,2	0,2	-0,5	0,2	0,5	0,5	
7.4	-0,5	0,5	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8	-0,8	-0,5	0,2	0,5	0,5	0,5	0,8	1	0,5	0,5	0,5	-0,8	-0,5	0,2	0,5	0,5	-0,8	0,2	0,5	0,8	
8.1	0,8	-0,8	0,2	0,5	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,8	-0,2		-0,5	-0,5	0,8	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	0,8	0,2	-0,2	-0,5	
8.2	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,2	0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,2	-0,2		-0,2	-0,5	0,2	0,5	-0,2	-0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,2	-0,5	
8.3	0,2	-0,2	0,4	-0,2	-0,2	-0,5	-0,5	0,2	0,5	0,8	-0,2	0,2	0,5	0,5	0,2	0,5	0,2	-0,2	0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,2	
8.4	-0,5	0,5	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8	-0,8	-0,5	-0,2	0,2	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,8	-0,5	-0,5	0,2	0,5	0,8	-0,8	0,2	0,5	0,8	
9.1	0,8	-0,8	0,2	0,5	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	0,5	-0,2	-0,5	-0,8	
9.2	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	0,2	-0,2	-0,5	-0,8
9.3	-0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,2	0,2	0,2	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,5	0,5	0,2	-0,2	
9.4	-0,5	0,5	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-0,8	-0,5	0,2	0,5	0,8	0,8	0,8	1	0,5	0,8	0,8	-0,8	-0,2	0,2	0,5	0,8	-0,8	0,2	0,5	0,8	
10.1					0,5	0,5	0,8	0,2	-0,2	-1	-0,5	-0,5	0,2	0,2	0,2	0,5	-0,2	0,5	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	0,5	0,2	-0,5	-0,8	
10.2					-0,5	-0,5	-0,5	0,2	0,5	1	0,2	0,5	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,5	-0,5	-0,2	0,5	0,2	-0,5	

Створена модель у формі МТ і матриць, що їх пов'язують, може бути використана для оцінювання ділянок потенційного підземного будівництва. Для цього необхідно отримати вхідні дані щодо конкретної ділянки, де експерт вказує

вірогідність кожної з альтернатив параметрів МТ першого етапу (усього 38 питань, по загальній кількості альтернатив), і далі після проведення двоетапної процедури МММА по відповідній ділянці можна отримати оцінки альтернатив рішень і пов'язаних із ділянкою ризиків. Розрахунки виконуються у розробленому програмному забезпеченні (розділ 5, на рис. 5.9 наведена структура модулів для цієї задачі). Використання моделі для оцінювання деяких ділянок м. Києва наведено в підрозділі 7.1.

6.3 Врахування структурно-функціональних факторів у прийнятті рішень щодо підземного будівництва

6.3.1 Модель оцінювання пріоритетності побудови підземних паркінгів

Однією з найбільш гострих проблем транспортної системи мегаполісу, яка може бути ефективно вирішена за допомогою планування підземного простору, є питання автостоянок у центральних районах міста, а також у периферійних районах, де прибуваючі жителі прилеглих територій переходять з власного транспорту на міський.

Задача вибору ділянки для будівництва підземного паркінга повинна враховувати більше характеристик території, оскільки окрім інженерно-геологічних параметрів, розглянутих у підрозділі 6.2, важливо також оцінювати вплив структурно-функціональних факторів, які визначатимуть потребу в розташуванні паркінгу у цьому місці, яка в свою чергу є основою інвестиційної привабливості ділянки. Для врахування в моделі структурно-функціональних факторів була розширена мережа морфологічних таблиць (рис. 6.1).

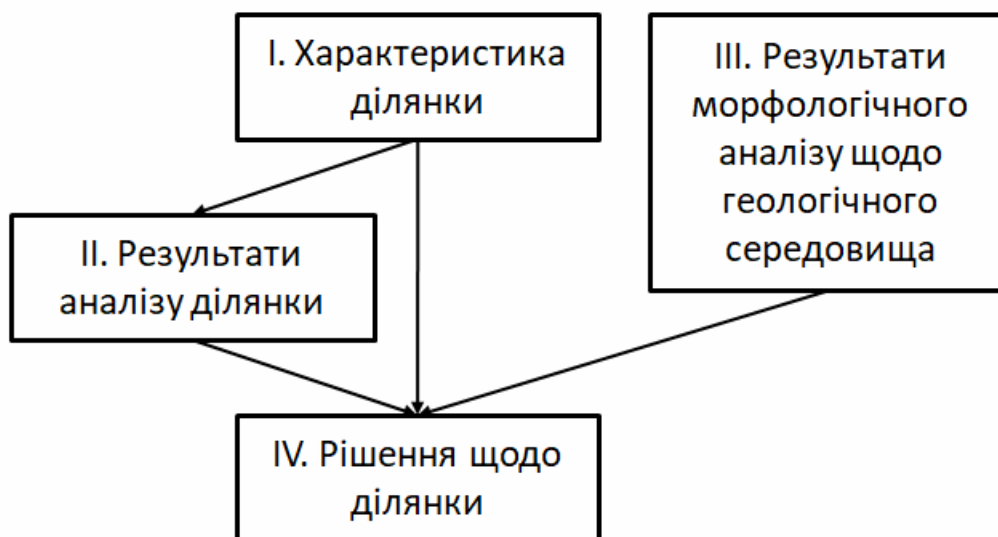


Рисунок 6.1 – Мережа морфологічних таблиць для оцінювання ділянки з точки зору будівництва паркінга

В таблиці «I. Характеристика ділянки» містяться структурно-функціональні параметри, які в тому числі впливають на потребу у паркомісцях:

1. Тип присутніх урбаністичних об'єктів (житлова забудова; офісні та адміністративні будівлі; торгівельні та розважальні центри; стадіони, концертні зали, театри; середні та вищі навчальні заклади; архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти; промислові підприємства);

2. Кількість мешканців в околі ділянки (до 1000; 1000–3000; 3000–6000; 6000–10000; більше 10000);

3. Кількість робочих місць в околі ділянки (до 500; 500–1000; 1000–3000; 3000–5000; більше 5000);

4. Середня швидкість руху автотранспорту в околі ділянки (висока – більше 60 км/год; середня – 30–60 км/год; низька – 15–30 км/год; дуже низька – менше 15 км/год);

5. Існуючі паркомісця (п/м), в т.ч. наземні та підземні, в околі ділянки (до 50 п/м; 50–200 п/м; 200–400 п/м; більше 400 п/м);

6. Доступність будівельних територій (без ускладнень; невеликі ускладнення; суттєві ускладнення). Цей параметр не впливає безпосередньо на потребу у паркомісцях, однак пов'язаний із оцінкою рішень (морфологічна таблиця «IV. Рішення щодо ділянки»).

Варто зазначити, що в якості околу ділянки розглядалась територія із радіусом 300 м як раціональної оцінки відстані, яку людина згодна пройти від припаркованої автівки. Перелік параметрів у вигляді МТ наведений в табл. 6.7. Для цієї МТ не використовувалась одноетапна процедура МММА, оскільки параметри, в основному, мало пов'язані між собою, і можуть бути безпосередньо оцінені без необхідності додаткового перерахунку.

Таблиця 6.7 – Морфологічна таблиця «І. Характеристика ділянки»

Параметр	Альтернативи параметра
1. Урбаністичні об'єкти	1.1. Житлова забудова
	1.2. Офісні та адміністративні будівлі
	1.3. Торгівельні та розважальні центри
	1.4. Стадіони, концертні зали, театри
	1.5. Середні та вищі навчальні заклади
	1.6. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти
	1.7. Промислові підприємства
2. Кількість мешканців	2.1. До 1000
	2.2. 1000–3000
	2.3. 3000–5000
	2.4. 5000–10000
	2.5. Більше 10000
3. Кількість робочих місць	3.1. До 500
	3.2. 500–1000
	3.3. 1000–3000
	3.4. 3000–5000
	3.5. Більше 5000
4. Швидкість руху автотранспорту	4.1. Висока
	4.2. Середня
	4.3. Низька
	4.4. Дуже низька
5. Існуючі паркомісця	5.1. До 50 п/м
	5.2. 50–200 п/м
	5.3. 200–400 п/м
	5.4. Більше 400 п/м
6. Доступність будівельних територій	6.1. Без ускладнень
	6.2. Невеликі ускладнення
	6.3. Суттєві ускладнення

Таблиця «ІІ. Результати аналізу ділянки» описує орієнтовний об'єм і тип попиту на паркомісця на відповідній території, і складається з двох параметрів:

7. Необхідність у паркомісцях (до 50 п/м; 50–200 п/м; 200–400 п/м; більше 400 п/м);

8. Тип потреби у паркомісцях (постійна – залишається незмінною в різний час; маятникова – залежить від часу доби, наприклад, бізнес-центри, торговельно-

розважальні комплекси; пікова – нерегулярні разові навантаження, наприклад, для стадіони, концертні зали і т.п.).

Вигляд МТ «II. Результати аналізу ділянки» показаний у табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – Морфологічна таблиця «II. Результати аналізу ділянки»

Параметр	Альтернативи параметра
7. Необхідність у паркомісцях	7.1. До 50 п/м
	7.2. 50–200 п/м
	7.3. 200–400 п/м
	7.4. Більше 400 п/м
8. Тип потреби у паркомісцях	8.1. Постійна
	8.2. Маятникова
	8.3. Пікова

Таблиця «III. Результати морфологічного аналізу щодо геологічного середовища» на рис. 6.1 фактично є фрагментом табл. 6.4 (другий етап оцінювання інженерно-геологічних факторів ділянки), з якої взяті параметри «А. Придатність ділянки», «В. Масштаб об'єкта», «С. Глибина забудови». В новій мережі ці параметри отримали номери, відповідно, 9, 10, 11. Дані в цій таблиці розраховуються на основі аналізу інженерно-геологічного середовища, як показано в підрозділі 6.2.

Кінцевим результатом роботи моделі є оцінка альтернатив параметрів МТ «IV. Рішення щодо ділянки», що складається з двох параметрів:

А. Доцільність будівництва паркінгу (доцільне; недоцільне);

В. Доцільний розмір паркінгу (до 50 п/м; 50–200 п/м; 200–400 п/м; більше 400 п/м).

На рішення щодо ділянки впливають всі попередні розглянуті морфологічні таблиці. У вигляді морфологічної таблиці «IV. Рішення щодо ділянки» наведена в табл. 6.9.

Таблиця 6.9 – Морфологічна таблиця «IV. Рішення щодо ділянки»

Параметр	Альтернативи параметра
А. Доцільність будівництва паркінгу	А.1. Будівництво доцільне
	А.2. Будівництво недоцільне
В. Доцільний розмір паркінгу	В.1. До 50 п/м
	В.2. 50–200 п/м
	В.3. 200–400 п/м
	В.4. Більше 400 п/м

Зв'язки між усіма МТ з рис. 6.1 задані за допомогою МЗАП. Ці матриці оцінювались експертним шляхом подібно до попередньої задачі (підрозділ 6.2), їх остаточний вигляд наведений в табл. 6.10 (вплив МТ I на МТ II), 6.11 (вплив МТ I, II, III на МТ IV).

Таблиця 6.10 – Оцінки впливу МТ «I. Характеристика ділянки» на МТ «II. Результати аналізу ділянки»

		7. Необхідність у паркомісцях				8. Тип потреби у паркомісцях		
		7.1	7.2	7.3	7.4	8.1	8.2	8.3
1. Урбаністичні об'єкти	1.1	0,8	0,5	0,5	0,2	0,8	0,5	0,2
	1.2	0,5	0,8	0,8	0,2	0,2	0,8	0,8
	1.3	0,2	0,5	0,8	1	0,5	0,2	0,2
	1.4	0,2	0,5	0,8	1	0,5	0,2	0,2
	1.5	0,5	0,8	0,5	0,2	0,2	0,8	0,5
	1.6	0,2	0,5	0,8	0,5	0,8	0,2	0,2
	1.7	0,5	0,8	0,8	0,5	0,2	0,8	0,5
	1.8	0	0	0	0	0	0	0
2. Кількість мешканців	2.1	-0,2	-0,5	-0,8	-1	0	0	0
	2.2	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	0,2	0	0
	2.3	0,8	0,8	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2
	2.4	0,5	1	1	0,5	0,8	0,2	0,2
	2.5	0,2	0,5	0,8	1	1	0,2	0,2
3. Кількість робочих місць	3.1	0,5	0,5	0,2	0,2	0	0,2	0,2
	3.2	0,5	0,8	0,8	0,5	0,2	0,5	0,5
	3.3	0,2	0,5	0,8	0,8	0,2	0,8	0,8
	3.4	-0,2	0,2	0,5	0,8	0,2	0,8	1
	3.5	-0,2	0,2	0,8	1	0,2	1	1
4. Швидкість руху автотранспорту	4.1	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8	-0,8	-0,5	-0,5
	4.2	0,5	0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,5	0,5
	4.3	0,2	0,5	0,8	0,8	0,5	0,8	0,8
	4.4	0,2	0,5	0,8	1	0,8	1	1
5. Існуючі паркомісця	5.1	0	0	0	0			
	5.2	0	0	0	-0,2			
	5.3	0	0	-0,2	-0,5			
	5.4	0	-0,2	-0,5	-0,8			

Використання моделі для оцінювання деяких ділянок м. Києва наведено в підрозділі 7.2.

6.3.2 Модель оцінювання пріоритетності побудови автомобільних тунелів

Метод морфологічного аналізу доцільно застосовувати для об'єктів, яким притаманна суттєва невизначеність, що в повній мірі є актуальним для задачі оцінювання потенційної ділянки будівництва автомобільного тунелю.

Таблиця 6.11 – Оцінки впливу МТ I, II, III на МТ «IV. Рішення щодо ділянки»

		А. Доцільність будівництва паркінгу		В. Доцільний розмір паркінгу			
		А.1	А.2	В.1	В.2	В.3	В.4
6. Доступність будівельних територій	6.1	0,8	-0,8	0,8	0,8	1	1
	6.2	0,2	-0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,2
	6.3	-0,5	0,5	-0,5	-0,8	-1	-1
7. Необхідність у паркомісцях	7.1	0	0,2	1	0,5	-0,5	-1
	7.2	0,2	0	0,5	1	0,5	0,2
	7.3	0,5	0	0,2	0,5	1	0,8
	7.4	0,8	0	0,2	0,5	0,8	1
8. Тип потреби у паркомісцях	8.1	0	0	1	0,8	0,5	0,2
	8.2	0,2	-0,2	0,2	0,5	0,8	1
	8.3	0,2	-0,2	0,2	0,5	0,8	1
9. Придатність ділянки	9.1	0,8	-0,8	1	1	0,8	0,8
	9.2	-0,8	0,5	-0,2	-0,5	-0,8	-1
10. Масштаб об'єкта	10.1	0,2	-0,2	1	0,2	-0,5	-1
	10.2	0	0	0,8	0,5	-0,5	-0,8
	10.3	0	0	0,2	0,5	0,8	0,8
	10.4	0	0	-0,2	0,2	0,8	1
11. Глибина забудови	11.1	1	-0,8	0,5	0,5	0,8	0,8
	11.2	0,8	-0,5	0,8	0,8	0,5	0,5
	11.3	0,2	-0,2	1	0,8	0,5	0,2
	11.4	-0,5	0,5	0,2	0,2	-0,2	-0,2

З інженерно-геологічної точки зору тунель є протяжним об'єктом, що може проходити через суттєво різні ділянки геологічного середовища. Крім того, точна оцінка всіх факторів впливу потребує суттєвих затрат часу і ресурсів, пов'язаних з проведенням інженерних і геологічних робіт і вимірювань, що не завжди є економічно доцільним на стадії прийняття рішення.

Зі структурно-функціональної точки зору потенційне будівництво тунелю впливає на досить велику частину міського простору, яка суттєво виходить за межі власне ділянки над трасою тунелю. У межах цього простору структурно-функціональні характеристики можуть значно відрізнятися, причому в їх оцінюванні присутній суб'єктивізм, пов'язаний як з якісною природою більшості з цих характеристик, так і з визначенням меж території, на яку вплине потенційне будівництво тунелю.

Метод морфологічного аналізу дозволяє певною мірою подолати різноманітність і суб'єктивізм за рахунок використання незалежних оцінок окремих альтернатив кожного з параметрів, і проведення перерахунку оцінок альтернатив

з використанням матриці взаємозв'язків, що коригує початкові грубі оцінки шляхом урахування впливу інших характеристик об'єкта.

Задачу побудови МТ з метою прийняття рішення щодо потенційної ділянки (траси) будівництва автомобільного тунелю було вирішено розбити на два завдання, які б враховували впливи факторів геологічного середовища та структурно-функціональних характеристик території з ризиками екологічних та техногенних загроз. Для кожної з них застосовувався двоетапний МММА.

Перше завдання стосувалось врахування геологічного середовища по трасі тунелю. За основу були взяті моделі, побудовані в рамках п. 6.2, 6.3.1, де була побудована модель оцінювання ділянок для підземного будівництва паркінгів. На відміну від відносно невеликих ділянок будівництва паркінгів, що локалізуються переважно в умовах однотипного геологічного середовища, тунелі мають значну протяжність (тисячі метрів) і можуть знаходитись у різних інженерно-геологічних та морфологічних умовах (мати змінні альтернативи параметрів впливу). Для коректного відображення цієї ситуації була запропонована методика врахування змінності альтернатив параметрів вздовж траси тунелю шляхом внесення експертом в опитувальні форми для кожної альтернативи такої оцінки, що відповідає протяжності ділянки з альтернативним параметром, віднесений до всієї довжини тунелю: однозначно ні – 0; переважно ні – від 0 до 0,25; скоріш ні, ніж так від 0,25 до 0,5; і так і ні в рівній мірі – 0,5; скоріше так ніж ні – від 0,5 до 0,75; переважно так – від 0,75 до 1; однозначно так – 1. Таким чином, кожна альтернатива параметру отримує свою оцінку у відповідності до імовірності реалізації по довжині тунелю. У випадку коли загрозливі альтернативи факторів зосереджуються на відносно невеликій ділянці тунелю, а ситуація на інших його ділянках значно відрізняється від найбільш несприятливої частини, треба окремо оцінювати весь тунель і найбільш ризиковану ділянку. Крім того, оскільки протяжна траса тунелю може потрапити в зону пливуну, який різко погіршує сприятливість ділянки підземному будівництву, ця важлива альтернатива була особливим чином врахована в МТ параметрів і досліджена окремо (п. 7.3.1).

Для опису геологічного середовища використовувалася МТ з 10 параметрами, представлена в табл. 6.3 (підрозділ 6.2). На основі оцінювання цієї таблиці розраховувались ваги елементів рішення. МТ для елементів рішення (табл. 6.4) була дещо адаптована порівняно із попереднім дослідженням: залишені тільки ті фактори ризику (параметр D), які пов'язані з інженерно-геологічними процесами, решта факторів ризику перейшли до другого завдання; крім того, модифіковані альтернативи рекомендованих масштабів і глибини підземного будівництва (параметри B, C) наведені з урахуванням того, що підземне будівництво стосується конкретного класу об'єктів (тунелі). Для параметра F (рівень ризику) розмір збитку враховується, як вартість будівництва тунелю Q, помножена на співвідношення довжини найбільш несприятливої ділянки W. Остаточний вигляд адаптованої МТ наведено в табл. 6.12.

Таблиця 6.12 – Морфологічна таблиця елементів рішення щодо ділянки будівництва тунелю

Параметр	Альтернатива
A. Придатність ділянки	A.1. Придатна
	A.2. Непридатна
B. Масштаб об'єкта	B.1. Площа перерізу до 10 м ²
	B.2. Площа перерізу до 25 м ²
	B.3. Площа перерізу до 40 м ²
	B.4. Площа перерізу понад 40 м ²
C. Рівень забудови	C.1. 0–10 м
	C.2. 10–20 м
	C.3. 20–60 м
	C.4. глибше 60 м
D. Фактор ризику	D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності
	D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд
	D.3. небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти
	D.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів
E. Ступінь ризику	E.1. <3%
	E.2. 3–10%
	E.3. 10–20%
	E.4. 20–50%
	E.5. >50%
F. Рівень ризику	F.1. 0,1–5% QW
	F.2. 5–20% QW
	F.3. 20–50% QW
	F.4. >50% QW

Друге завдання стосувалось врахування структурно-функціональних характеристик території, в районі якої проходить тунель. Метою цього завдання було визначення доцільності побудови тунелю, а також різномісних ризиків, які є

актуальними для цієї території, з огляду на забудову, характерну для цієї території, дорожню мережу, характеристики руху транспорту в районі потенційного тунелю.

Серед ризиків, які найбільш доцільно розглядати, можна сформуванати чітку групу техногенних і екологічних ризиків, які можна мінімізувати шляхом будівництва тунелів:

- P1. Забруднення повітря (викиди шкідливих вихлопних газів);
- P2. Шум і динамічні впливи (гул двигунів, лягання трамваїв та ін.);
- P3. Дорожні затори (зменшення середньої швидкості руху, порушення функції транспорту, підвищенні викиди шкідливих газів);
- P4. Дорожні аварії (транспортний колапс, травмування людей).

Обрана група ризиків певною мірою визначила побудову МТ для завдання аналізу структурно-функціональних характеристик території за допомогою МММА.

Побудована МТ першого етапу містить 8 параметрів, які є найбільш важливими для визначення доцільності тунелю і його впливу на мінімізацію різного роду ризиків:

1) тип забудови в районі потенційного тунелю – цей параметр впливає в першу чергу на вагомість різних факторів ризику. Для житлової забудови, туристичних об'єктів, парків більшу вагу мають фактори забруднення повітря і шуму; для промислової забудови і незабудованих територій ця вага значно менша;

2) щільність житлової забудови – параметр доповнює попередній, тісно пов'язаний з рядом інших параметрів і теж визначає вагомість факторів ризику;

3) фактор середмістя – визначає, наскільки територію можна віденсти до такої, що входить до середмістя або впливає на автомобільний рух у середмісті;

4) залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю – параметр впливає на вагомість факторів ризику – в першу чергу, аварій (більший ризик для пішоходів), також факторів шуму і забруднення. Також параметр впливає на

здатність тунелю зменшити вплив факторів ризику, оскільки тунель створює менше можливостей для аварій і заторів, викликаних пішохідними переходами;

5) інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю – параметр першочергово впливає на доцільність побудови тунелю. Також є помітний вплив цього параметра на вагомість факторів ризику – чим інтенсивніший рух, тим більш важливим стає фактор заторів. При великій інтенсивності руху тунель значно вплине на всі фактори ризику – чим інтенсивніший рух буде переведено в тунель, тим менше буде вплив всіх розглядуваних факторів ризику;

6) середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю – параметр змінює вплив тунелю на фактори ризику: якщо швидкість була низька – тунель зменшує фактор забруднення і заторів, якщо швидкість була висока – тунель зменшує фактор шуму і аварій. Також висока швидкість свідчить про вагомість фактору аварій – на високій швидкості аварії є більш небезпечними;

7) наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами – параметр впливає на доцільність побудови тунелю, вагомість фактору заторів – при поганій зв'язаності наявність або відсутність заторів є дуже критичною. Відповідно, є зв'язок і в протилежний бік – якщо зв'язаність була погана, то побудова тунелю здійснює позитивний вплив на фактор заторів за рахунок розвантаження шляхів;

8) пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю (ширина доріг, наявність перехресть, в тому числі нерегульованих) – параметр впливає на доцільність побудови тунелю, вагомість фактору заторів – при поганій пропускній здатності наявність або відсутність заторів є дуже критичною, потенційний тунель здійснює позитивний вплив на фактор заторів і аварій.

МТ з вищезазначеними параметрами і їх альтернативами наведена в табл. 6.13.

Таблиця 6.13 – Морфологічна таблиця впливу на структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори

Параметр	Альтернативи параметра
1. Тип забудови в районі потенційного тунелю	1.1. Житлова забудова
	1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова
	1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти
	1.4. Парки, зони відпочинку
	1.5. Промислова забудова
	1.6. Незабудовані території
2. Щільність житлової забудови	2.1. Дуже низька
	2.2. Низька
	2.3. Середня
	2.4. Висока
3. Фактор середмістя	3.1. Ділянка розташована в зоні середмістя
	3.2. Ділянка поза середмістям, але суттєво впливає на автомобільний рух у середмісті
	3.3. Ділянка поза середмістям (без впливу на нього)
4. Залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю	4.1. Дуже низька
	4.2. Низька
	4.3. Середня
	4.4. Висока
5. Інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю	5.1. Низька
	5.2. Середня
	5.3. Висока
	5.4. Дуже висока
6. Середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю	6.1. до 15 км/год
	6.2. 15-30 км/год
	6.3. 30-60 км/год
7. Наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами	7.1. Дуже погана (немає відносно прямих шляхів, значний об'їзний рух з певними недоліками,)
	7.2. Погана (між кінцями тунелю є лише один шлях, який має певні недоліки)
	7.3. Середня (між кінцями тунелю є один магістральний шлях або декілька альтернативних шляхів з недоліками)
	7.4. Добра (між кінцями тунелю є більше одного магістрального шляху)
8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю	8.1. Погана (вузькі дороги, багато перехресть, особливо нерегульованих, захаращеність шляхів)
	8.2. Середня (є перехрестя, але в основному регульовані)
	8.3. Висока (магістралі, мало перехресть, вони регульовані)

Очевидно, ці параметри є взаємопов'язаними, тому в дослідженні пропонується використати повноцінну двоетапну процедуру МММА, з перерахунком оцінок також і на першому етапі дослідження для урахування взаємозв'язків між параметрами. Наявність або відсутність взаємозв'язків для параметрів таблиці 4 оцінена матрицею, наведеною в табл. 6.14, де позначка «+» означає наявність взаємозв'язків між хоча б однією парою відповідних параметрів, «-» означає відсутність таких зв'язків. Проведення цього попереднього аналізу наявності зв'язків дозволяє суттєво зменшити навантаження на експертів за рахунок виключення завідомо беззмістовних питань.

Таблиця 6.14 – Матриця наявності або відсутності взаємозв'язків між параметрами табл. 6.13

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		+	+	+	+	-	-	-
2	+		+	+	+	-	-	-
3	+	+		-	+	+	+	+
4	+	+	-		-	-	-	-
5	+	+	+	-		+	+	-
6	-	-	+	-	+		+	+
7	-	-	+	-	+	+		-
8	-	-	+	-	-	+	-	

Для другого етапу МММА побудована МТ, яка показує доцільність побудови тунелю зі структурно-функціональної точки зору, а також профіль території потенційного будівництва тунелю з точки зору екологічно-безпекових факторів, пов'язаних зі зменшенням ризиків.

Ризики розглядались у двох аспектах:

1) Вагомість кожної із зазначених вище груп факторів ризику Р1–Р4. В даному випадку аналізується, наскільки той чи інший фактор ризику є важливим для конкретної території – наприклад, чим більше щільність населення, тим вагомішим є фактор забруднення повітря; чим більше інтенсивність руху, тим важливішим є фактор наявності чи відсутності заторів і т.д.

2) Здатність побудованого тунелю вплинути на мінімізацію відповідних факторів ризику. Аналізується, наскільки для даної території тунель зможе посприяти запобіганню або зменшенню відповідного фактору ризику. Значною мірою, це залежить від інтенсивності руху, однак для деяких факторів ризику можна встановити залежності і з іншими параметрами з табл. 6.13.

Два цих аспекти певною мірою корелюють, однак іноді є суттєві відмінності, які вимагають їх розгляду за допомогою різних параметрів. Наприклад, для великої щільності населення (залюдненості району) фактор забруднення повітря має суттєву вагу, однак здатність тунелю вплинути на цей фактор залежить не від щільності населення, а від зміни інтенсивності автомобільного руху (переведення його значною мірою на підземний рівень). Тому для аналізу ризиків було виділено 5 параметрів: один з них порівнює між собою вагомість різних факторів

ризик, його альтернативи формують «профіль» території з точки зору важливості різних факторів ризику, а інші чотири параметри описують здатність тунелю позитивно вплинути на зменшення кожної окремої з чотирьох розглядуваних груп ризику. Параметри для МТ другого етапу МММА зведені в табл. 6.15:

Таблиця 6.15 – Морфологічна таблиця структурно-функціональних і екологічно-безпекових факторів будівництва тунелю

Параметр	Альтернатива
А. Доцільність тунелю	А.1. Доцільний
	А.2. Недоцільний
В. Вагомість факторів ризику на ділянці	В.1. Забруднення повітря
	В.2. Шум і динамічні впливи
	В.3. Дорожні затори
	В.4. Дорожні аварії
С. Вплив побудови тунелю на фактор «Забруднення повітря»	С.1. Не впливає
	С.2. Частково мінімізує
	С.3. Помірно мінімізує
	С.4. Суттєво мінімізує
D. Вплив побудови тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»	D.1. Не впливає
	D.2. Частково мінімізує
	D.3. Помірно мінімізує
	D.4. Суттєво мінімізує
Е. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні затори»	E.1. Не впливає
	E.2. Частково мінімізує
	E.3. Помірно мінімізує
	E.4. Суттєво мінімізує
F. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні аварії»	F.1. Не впливає
	F.2. Частково мінімізує
	F.3. Помірно мінімізує
	F.4. Суттєво мінімізує

Морфологічні таблиці, представлені в табл. 6.13 і табл. 6.15, пов'язані між собою МЗАП, що описує вплив МТ першого етапу на МТ другого етапу. Як і для першого етапу, попередній аналіз наявності таких зв'язків дозволяє скоротити опитувальні форми. Наявність або відсутність зв'язків представлена в табл. 6.16.

Таблиця 6.16 – Матриця наявності або відсутності впливу параметрів табл. 6.13 на параметри табл. 6.15

	A	B	C	D	E	F
1	–	+	–	–	–	–
2	–	+	–	–	–	–
3	+	+	–	–	–	–
4	+	+	–	–	+	+
5	+	+	+	+	+	+
6	+	+	+	+	+	+
7	+	+	–	–	+	–
8	+	+	–	–	+	+

Аналіз зв'язків і взаємозв'язків між параметрами (табл. 6.14, 6.16) дав змогу зменшити навантаження на експертів за рахунок виключення з опитувальних форм питань щодо пар альтернатив, між якими, очевидно, відсутні безпосередні відношення. Таким чином, для побудови морфологічної моделі знадобилось близько 200 і 400 питань для першого і другого етапів відповідно.

Використання моделі для порівняння двох ділянок потенційного будівництва тунелів показано в п. 7.3.2.

6.3.2.1 Врахування безпекового фактору в моделі оцінювання пріоритетності побудови автомобільних тунелів

Військова агресія проти України у 2022 р., ракетні та дроніві атаки Києва та інших міст призвели до необхідності суттєво враховувати також безпековий фактор у плануванні інфраструктури. Оскільки, тунелі можуть виконувати функцію захисту критичної інфраструктури, табл. 6.13 була переглянута для врахування вразливості і критичності ділянки. Також були внесені незначні зміни до інших морфологічних параметрів для коригування дрібних недоліків, виявлених у базовій моделі. Розширений вигляд МТ для оцінювання структурно-функціональних факторів наведено в табл. 6.17.

В табл. 6.17, порівняно з попередньою моделлю, доданий параметр «9. Ступінь критичності об'єкту транспортної інфраструктури», який характеризує, наскільки складно може бути передати функції цього об'єкта іншим об'єктам інфраструктури (наприклад, для мостового переходу стан критичності є високим, оскільки при пошкодженні мосту об'їзний шлях може стати суттєво довшим), і параметр «10. Стан вразливості транспортної інфраструктури», який вказує, наскільки складно призвести до припинення функціонування об'єкта інфраструктури. Параметри «Щільність житлової забудови» і «Залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю», що здійснюють схожий вплив на результат, були замінені на один параметр «3. Щільність населення». Параметр «Інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю» був

реорганізований у параметри «4. Маятниковий рух працівників» і «5. Щільність магістральної мережі». Також був розширений параметр «2. Фактор середмістя» для уточнення класифікації ділянок за межами середмістя.

Таблиця 6.17 – Доповнена морфологічна таблиця впливу на структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори

1. Тип забудови	2. Фактор середмістя	3. Щільність населення	4. Маятниковий рух працівників	5. Щільність магістральної мережі
1.1. Житлова забудова	2.1. Ділянка розташована в зоні середмістя	3.1. До 50 осіб/га	4.1. Низький	5.1. 0,5-1 км/км ²
1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова	2.2. Ділянка поза середмістям, але суттєво впливає на автомобільний рух у середмісті	3.2. 50–100 осіб/га	4.2. Середній	5.2. 1-1,5 км/км ²
1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти	2.3. Ділянка поза середмістям загальноміського значення	3.3. 100-200 осіб/га	4.3. Високий	5.3. 1,5-2 км/км ²
1.4. Парки, зони відпочинку	2.4. Ділянка поза середмістям місцевого значення	3.4. Більше 200 осіб/га		5.4. 2-2,5 км/км ²
1.5. Промислова забудова				
1.6. Незабудовані території				
6. Середня швидкість автомобільного руху у години «пік»	7. Наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами	8. Пропускна здатність наземних шляхів	9. Ступінь критичності об'єкту транспортної інфраструктури	10. Стан вразливості транспортної інфраструктури
6.1. до 20 км/год	7.1. Незадовільна	8.1. Погана	9.1. Об'єкт критичної інфраструктури, функції якого можуть бути передані іншим об'єктам лише з великими втратами	10.1. Високий
6.2. 20-40 км/год	7.2. Частково задовільна	8.2. Середня	9.2. Об'єкт критичної інфраструктури, функції якого можуть бути передані іншим об'єктам з помірними втратами	10.2. Середній
6.3. понад 40 км/год	7.3. Задовільна	8.3. Висока	9.3. Об'єкт транспортної інфраструктури, що не належить до критичної	10.3. Низький
	7.4. Добра			

В табл. 6.17, порівняно з попередньою моделлю, доданий параметр «9. Ступінь критичності об'єкту транспортної інфраструктури», який характеризує, наскільки складно може бути передати функції цього об'єкта іншим об'єктам інфраструктури (наприклад, для мостового переходу стан критичності є високим,

оскільки при пошкодженні мосту об'їзний шлях може стати суттєво довшим), і параметр «10. Стан вразливості транспортної інфраструктури», який вказує, наскільки складно призвести до припинення функціонування об'єкта інфраструктури. Параметри «Щільність житлової забудови» і «Залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю», що здійснюють схожий вплив на результат, були замінені на один параметр «3. Щільність населення». Параметр «Інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю» був реорганізований у параметри «4. Маятниковий рух працівників» і «5. Щільність магістральної мережі». Також був розширений параметр «2. Фактор середмістя» для уточнення класифікації ділянок за межами середмістя.

Морфологічна таблиця структурно-функціональних і екологічно-безпекових факторів будівництва тунелю також була доповнена двома факторами: «Протяжність маршруту сполучення» і «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів». Остаточний вигляд цієї таблиці показано в табл. 6.18.

Приклад використання доповненої моделі показано в п. 7.3.3.

6.3.2.2 Гібридна модель на основі МММА і методу аналізу ієрархій

Метод аналізу ієрархій (МАІ) [96, 97] і його модифікація [77, 154] орієнтовані в першу чергу на задачу підтримки прийняття рішень, з використанням складної ієрархічної структури для врахування всіх цілей і критеріїв, що впливають на загальне рішення. Цей метод також застосовувався в ряді задач, зокрема, вибору пріоритетних заходів вирішення соціальних проблем м. Києва, оцінювання сценаріїв розвитку транспортної системи м. Києва [154], оцінювання пріоритетності екологічних проєктів Одеської області [65] тощо. Метод дає змогу отримати обґрунтоване ранжування ряду об'єктів, однак при цьому потрібні експертні парні порівняння, що вносить певний суб'єктивізм у процес оцінювання, особливо у разі заангажованості експерта щодо деяких альтернатив; також при появі великої кількості альтернатив необхідна кількість експертних оцінок швидко зростає.

Таблиця 6.18 – Доповнена морфологічна таблиця структурно-функціональних і екологічно-безпекових факторів будівництва тунелю

Параметр	Альтернатива
А. Доцільність тунелю	А.1. Доцільний
	А.2. Недоцільний
В. Вагомість факторів ризику на ділянці	В.1. Забруднення повітря
	В.2. Шум і динамічні впливи
	В.3. Дорожні затори
	В.4. Дорожні аварії
	В.5. Протяжність маршруту сполучення
	В.6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів
С. Вплив побудови тунелю на фактор «Забруднення повітря»	С.1. Не впливає
	С.2. Частково мінімізує
	С.3. Помірно мінімізує
	С.4. Суттєво мінімізує
D. Вплив побудови тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»	D.1. Не впливає
	D.2. Частково мінімізує
	D.3. Помірно мінімізує
	D.4. Суттєво мінімізує
Е. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні затори»	E.1. Не впливає
	E.2. Частково мінімізує
	E.3. Помірно мінімізує
	E.4. Суттєво мінімізує
F. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні аварії»	F.1. Не впливає
	F.2. Частково мінімізує
	F.3. Помірно мінімізує
	F.4. Суттєво мінімізує
G. Вплив побудови тунелю на фактор «Протяжність маршруту сполучення»	G.1. Не впливає
	G.2. Частково мінімізує
	G.3. Помірно мінімізує
	G.4. Суттєво мінімізує
H. Вплив побудови тунелю на фактор «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»	H.1. Не впливає
	H.2. Частково мінімізує
	H.3. Помірно мінімізує
	H.4. Суттєво мінімізує

Комбінування МММА і МАІ дозволяє поєднати їх сильні сторони для отримання моделі, що може обробити велику кількість конфігурацій об'єкта і при цьому дати чіткий результат у відповідності до поставлених цілей. На основі табл. 6.18 можна побудувати трьохрівневу ієрархію, як показано на рис. 6.2.

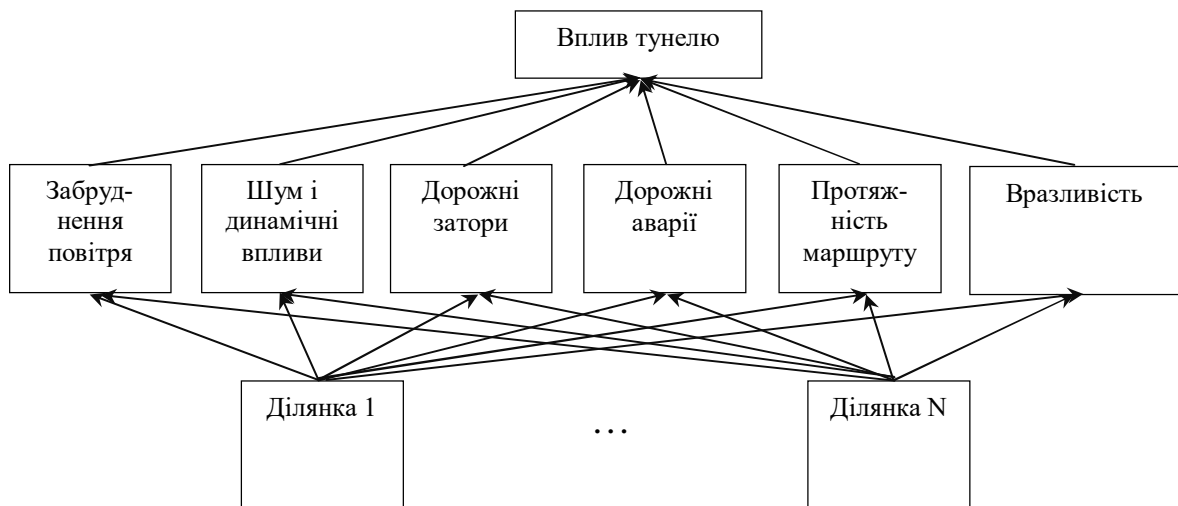


Рисунок 6.2 – Ієрархія факторів впливу тунелю

Вагові коефіцієнти ієрархічної моделі можуть бути визначені на основі результатів розрахунку МММА. Таким чином, комбінована процедура модифікованого методу морфологічного аналізу і методу аналізу ієрархій складалась із наступних кроків:

1. Визначення структурно-функціональних факторів ділянки, запланованої під будівництво автомобільного тунелю, і факторів ризику, які будівництво тунелю може мінімізувати.

2. Побудова двоетапної моделі модифікованого методу морфологічного аналізу для довільної ділянки, що на основі аналізу структурно-функціональних факторів цієї ділянки оцінює важливість і вплив майбутнього тунелю на обрані фактори ризику.

3. Внесення інформації про конкретні ділянки і розрахунок впливів потенційних тунелів за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу.

4. Автоматичне перетворення отриманих результатів для генерування парних порівнянь, і в подальшому локальних ваг тунелів відносно факторів ризику.

5. Порівняння факторів ризику за важливістю, і розрахунок пріоритетів ділянок на основі методу аналізу ієрархій.

Локальні ваги ділянок відносно кожного з факторів ризику розраховуються на основі результатів двохетапного МММА для параметрів С–Н. Для цього

формується матриці парних порівнянь ділянок відносно кожного з факторів ризику, за допомогою наступного співвідношення:

$$d_{ij}^{(f)} = -2(w_{i,n}^{(f)} - w_{j,n}^{(f)}) - (w_{i,c}^{(f)} - w_{j,c}^{(f)}) + (w_{i,n}^{(f)} - w_{j,n}^{(f)}) + 2(w_{i,c}^{(f)} - w_{j,c}^{(f)}), i, j \in \overline{1,8}, \quad (6.1)$$

де f – фактор ризику; $w_{i,n}^{(f)}$ – оцінка значення «не впливає» для ділянки i і фактору ризику f ; $w_{i,c}^{(f)}$, $w_{i,n}^{(f)}$, $w_{i,c}^{(f)}$ – оцінки значень, відповідно, «частково мінімізує», «помірно мінімізує» і «суттєво мінімізує» для ділянки i і фактору ризику f .

На основі співвідношення (6.1) легко довести, що $d_{ij}^{(f)} = -d_{ji}^{(f)}$, $d_{ii}^{(f)} = 0$, тобто матриця, задана цими величинами, буде коректною адитивною матрицею парних порівнянь. Також легко довести, що $\forall_{i,j,f} d_{ij}^{(f)} \in [-4;4]$ (крайні випадки спостерігаються лише тоді, коли одна ділянка має оцінку значення «не впливає», рівну 1, тоді як друга ділянка має оцінку значення «суттєво мінімізує», рівну 1). Перейдемо до мультиплікативної матриці за допомогою співвідношення (6.2):

$$d'_{ij}{}^{(f)} = 9^{\frac{d_{ij}^{(f)}}{4}}. \quad (6.2)$$

Матриця D' , побудована на основі співвідношень (6.2), буде коректною мультиплікативною матрицею, до якої застосовні методи отримання ваг [78]. Крім того, легко довести, що вона буде теоретично узгодженою, а отже отримані ваги не залежать від способу їх розрахунку.

Інтегрована оцінка на основі методу аналізу ієрархій потребує також оцінювання факторів ризику. Тут пропонуються два підходи:

1) використання в якості ваги оцінки важливості відповідного фактору ризику, отриманої в результаті двоетапного МММА (параметр В з табл. 6.18). В МАІ прийнято використовувати однакові ваги критеріїв для порівняння наборів альтернатив, однак його процедура легко узагальнюється на випадок різних ваг;

2) використання окремого експертного оцінювання для порівняння критеріїв, і визначення ваг на основі методів обробки матриць парних порівнянь.

В першому підході процес є більш автоматизований, оскільки він не потребує додаткових вхідних даних, і враховує потреби конкретної ділянки, оцінені параметром В в ході МММА, тобто здатність тунелю вирішувати саме ті

проблеми, які визначені як найбільш пріоритетні для цієї ділянки. Другий підхід є більш гнучким, і дозволяє оцінити рішення з урахуванням цілей і вимог осіб, що приймають рішення.

Використання гібридного методу проілюстроване в п. 7.3.4.

6.4 Використання модифікованого методу морфологічного аналізу для оцінки небажаних подій, пов'язаних з урбаністичними об'єктами

Метою побудови даної морфологічної моделі є опис небажаних подій, які потенційно можуть вплинути на деякий підземний урбаністичний об'єкт або клас об'єктів. Такі небажані події можуть включати як природні стихійні лиха та катастрофи, так і події техногенного або антропогенного походження (зокрема – зі злим умислом: військові дії, терористичні акти). Результатом цього моделювання є аналіз наслідків події для об'єкта дослідження, можливість порівняти різні об'єкти або їх проекти з точки зору стійкості та здатності протистояти різноманітним небажаним подіям.

Для моделювання залучено двоетапний модифікований метод морфологічного аналізу, в якому на першому етапі описується множина потенційних небажаних подій, а на другому етапі аналізуються наслідки цих подій у різних аспектах для об'єкта дослідження. Особливістю цього дослідження є те, що для різних об'єктів і класів об'єктів принципово відрізняються зв'язки між параметрами небажаних подій і їх наслідками, тому розгляд кожного окремого об'єкта вимагає не тільки заповнення вхідних оцінок альтернатив, як це було в попередніх розділах, а і заповнення матриць взаємозв'язків і зв'язків.

Для виділення основних характеристичних параметрів небажаних подій була опрацьована законодавча база щодо загроз безпеці людини та урбаністичного середовища, зокрема Закони України, Укази Президента України та Постанови Кабінету Міністрів: «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру», «Про Цивільну оборону України», «Про боротьбу з тероризмом», «Про об'єкти підвищеної

небезпеки», «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення», «Про Концепцію захисту населення і територій у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій», «Про заходи щодо підвищення рівня захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру», «Про інженерний захист територій, об'єктів і споруд від зсувів», «Про затвердження Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру», а також нормативна документація: ДБН В.1.1-3-97 «Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів», ДБН В.2.2.5-97 «Захисні споруди цивільної оборони», ДБН В.1.1-5-2000 «Будинки і споруди на підтоплюваних територіях та просідаючих ґрунтах», ДБН В.1.2-4-2006 «Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони)», ДБН Б.1.1-6:2007 «Склад, зміст, порядок розроблення, погодження та затвердження схем планування території району» та ін.

Аналіз дозволив виділити три основних характеристичних параметри небажаних подій, релевантних для цього дослідження.

Параметр 1: Тип небажаної події. Розглядається саме першопричина, або тригер небажаної події. Зрозуміло, що такі події можуть викликати певну ланцюгову реакцію: наприклад, вибух спричинює пожежу, пожежа спричинює руйнування і т.д., однак в рамках даного дослідження подальші руйнівні процеси відносяться вже до наслідків, оскільки розглянути всі можливі варіанти перебігу небажаних подій неможливо й недоцільно.

Виділено шість основних альтернатив типів небажаних подій:

- вибух;
- пожежа;
- зсуви, провали та просідання ґрунту;
- погодні катаклізми;
- експлуатаційні пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту;
- порушення функціонування без конструктивних пошкоджень.

Варто зазначити, що в цьому дослідженні будується універсальна модель, тому для деяких об'єктів певні типи небажаних подій є в принципі неможливими

(наприклад, пожежа для водостічного трубного дюкера, що прокладений по дну річки). В таких випадках при оцінюванні дана альтернатива отримує оцінку ймовірності «0» і, відповідно, не бере участь у подальшій процедурі модифікованого методу морфологічного аналізу.

Параметр 2: Походження небажаної події. Виділено 4 альтернативних походження для небажаних подій:

- антропогенне зі злим умислом (тероризм, диверсії, бойові дії);
- антропогенне без злого умислу (помилки, недбалість, недотримання норм будівництва або експлуатації);
- технічне, технологічне (технічні відмови, поламки, руйнування за рахунок технологічних факторів, корозії тощо);
- природне (атмосферні, гідросферні й літосферні збурення, стихійні лиха).

Параметр 3: Масштаб впливу небажаної події. Розглядаються 5 альтернатив:

- окремий структурний або функціональний елемент об'єкта, або окрема ділянка;
- декілька структурних або функціональних елементів об'єкта, або декілька ділянок;
- об'єкт повністю;
- об'єкт і сусідні до нього;
- район міста і більше.

Розгляд катастроф більших масштабів виходить за межі цього дослідження, оскільки розглядаються наслідки небажаної події в рамках певного об'єкта. Тому катастрофи великих масштабів об'єднані в альтернативу «район міста і більше».

Побудуємо морфологічну таблицю на основі запропонованих параметрів (табл. 6.19).

Таблиця 6.19 – Опис небажаних подій для урбаністичного об'єкта

Параметр	Альтернатива
1. Тип небажаної події	1.1 Вибух
	1.2 Пожежа
	1.3 Зсуви, провали та просідання ґрунту
	1.4 Погодні катаклізми
	1.5 Експлуатаційні пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту
	1.6 Порушення функціонування без конструктивних пошкоджень
2. Походження небажаної події	2.1 Антропогенне зі злим умислом
	2.2 Антропогенне без злого умислу
	2.3 Технічне, технологічне
	2.4 Природне
3. Масштаб впливу небажаної події	3.1 Окремий структурний або функціональний елемент об'єкта, або окрема обмежена ділянка
	3.2 Декілька структурних або функціональних елементів об'єкта, або декілька ділянок
	3.3 Об'єкт повністю
	3.4 Об'єкт і сусідні до нього
	3.5 Район міста і більше

Очевидно, що параметри таблиці сильно залежать один від одного, тому при побудові моделі необхідно оцінювати і враховувати матрицю взаємозв'язків цих параметрів, причому для різних типів об'єктів параметри небажаних подій можуть бути пов'язані неоднаково, що вимагає окремого оцінювання матриці взаємозв'язків для кожного наступного типу об'єкта, що розглядається.

Морфологічна таблиця другого етапу дослідження містить параметри наслідків небажаних подій, і їх альтернативи. Оскільки наслідки можуть бути досить різноплановими, для всебічного їх розгляду виділено 8 параметрів.

Параметр А. Цілісність об'єкта/його елементів. Параметр описує, наскільки сильні пошкодження отримав об'єкт в результаті впливу небажаної події. Можна виділити чотири принципово відмінні альтернативи:

- пошкоджень немає або вони мінімальні;
- пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності;
- пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності;
- пошкодження невідновні.

Параметр Б. Здатність до функціонування. Параметр описує, в якій мірі об'єкт може виконувати свої функції при впливі небажаної події. Задано три альтернативи:

- об'єкт може виконувати всі функції;
- об'єкт може виконувати частину функцій;
- об'єкт припиняє функціонування.

Параметр В. Можливість передачі функцій іншим об'єктам. Параметр показує, чи можуть функції об'єкта в разі необхідності (тобто неможливості виконувати свої функції як наслідку небажаної події) бути передані іншим урбаністичним об'єктам. Задано чотири альтернативи:

- функції об'єкта можуть бути передані без обмежень;
- функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями;
- функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями;
- функції об'єкта не можуть бути передані.

Параметр Г. Час відновлення функціонування. Параметр описує, скільки часу знадобиться для відновлення об'єкта після впливу небажаної події. Задано п'ять альтернатив:

- час на відновлення функціонування непотрібний;
- відновлення функціонування може бути здійснене за час до 7 діб;
- відновлення функціонування може бути здійснене за час до 1 місяця;
- відновлення функціонування може бути здійснене за час до 0,5 року;
- об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року.

Параметр Д. Кількість постраждалих. Параметр вказує приблизну кількість осіб, які можуть постраждати в разі настання небажаної події на об'єкті. Задано п'ять альтернатив у відповідності з нормативними документами:

- постраждалих немає;
- до 10 осіб;
- 10–50 осіб;
- 50–200 осіб;

- більше 200 осіб.

Параметр Е. Порухені умови життєдіяльності. Параметр вказує приблизну кількість осіб, умови життєдіяльності яких можуть бути порушені в разі настання небажаної події на об'єкті. Задано п'ять альтернатив у відповідності з нормативними документами:

- таких осіб немає;
- до 10 осіб;
- 10–100 осіб;
- 100–1000 осіб;
- більше 1000 осіб.

Параметр Ж. Розмір матеріальних збитків. Параметр описує очікуваний розмір збитків в разі настання небажаної події на об'єкті. Збитки оцінюються відносно кількості мінімальних розмірів заробітної плати (МЗП). Задано чотири альтернативи у відповідності з нормативними документами:

- до 100 МЗП;
- 100–1000 МЗП;
- 1000–10000 МЗП;
- більше 10000 МЗП.

Параметр З. Екологічні наслідки. Параметр описує потенційні ризики для екологічної ситуації, якщо станеться небажана подія на об'єкті. Задано чотири альтернативи:

- немає помітних екологічних наслідків;
- незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації;
- значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території;
- екологічна катастрофа.

Параметри наслідків небажаних подій можна звести в морфологічну таблицю (табл. 6.20).

Таблиця 6.20 – Опис наслідків небажаних подій для урбаністичних об'єктів

Параметр	Альтернатива
А) Цілісність об'єкта/його елементів	A.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні
	A.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності
	A.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності
	A.4 Пошкодження невідновні
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування
В) Можливість передачі функцій іншим об'єктам	В.1 Функції об'єкта можуть бути передані без обмежень
	В.2 Функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями
	В.3 Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями
	В.4 Функції об'єкта не можуть бути передані
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний
	Г.2 До 7 діб
	Г.3 До 1 місяця
	Г.4 До 0,5 року
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає
	Д.2 До 10 осіб
	Д.3 10–50 осіб
	Д.4 50–200 осіб
	Д.5 Більше 200 осіб
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає
	Е.2 До 10 осіб
	Е.3 10–100 осіб
	Е.4 100–1000 осіб
	Е.5 Більше 1000 осіб
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП
	Ж.2 100–1000 МЗП
	Ж.3 1000–10000 МЗП
	Ж.4 більше 10000 МЗП
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає
	З.2 Незначне, локальне, короточасне погіршення екологічної ситуації
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території;
	З.4 Екологічна катастрофа

Таким чином, для заданого типу об'єктів на основі розрахунків МММА дана модель може виявити потенційні наслідки. Такий аналіз для задач дослідження для деяких типів об'єктів наведений в підрозділі 7.5.

6.5 Системний підхід до структурно-функціонального планування підземного простору мегаполісів з використанням мережі морфологічних таблиць

При плануванні розміщення підземних споруд має застосовуватися системний підхід, який повинен поєднати синергетичні впливи трьох складових:

1) наземної частини міської території, у тому числі: наземної забудови, наземних транспортних комунікацій, інженерної інфраструктури, водного середовища, земельних ресурсів;

2) підземної частини міста (існуючої та вже запланованої), що включає георесурси, підземні транспортні комунікації (тунелі та станції метрополітену, автомобільні тунелі, пішохідні переходи, автостоянки та ін.), підземні об'єкти інженерного (гідротехнічні й енергетичні споруди, інженерні мережі) та суспільного призначення (торгівельно-розважальні центри, спортивні й готельні комплекси, музеї тощо);

3) геологічного середовища, що характеризується певними інженерно-геологічними й гідрогеологічними властивостями, освоєння якого пов'язане з вибором відповідних будівельних геотехнологій.

В попередніх підрозділах вже побудовано декілька моделей щодо оцінювання потенційних ділянок підземного будівництва з урахуванням інженерно-геологічних, структурно-функціональних факторів і факторів ризику. Особливістю морфологічного підходу є багатоаспектна класифікація об'єкта, а різнорідні класифікації територій є ключовими у процесі структурно-функціонального планування міського простору. При цьому класифікація не має бути жорсткою, оскільки за багатьма параметрами території міста можуть бути віднесені до декількох класів одночасно з різним ступенем належності, що в повній мірі може бути описано модифікованим методом морфологічного аналізу.

Попередні задачі функціонально-планувальної оптимізації використання підземного простору розглядалися окремо в залежності від інженерно-геологічних факторів (підрозділ 6.2), або з урахуванням структурно-функціональних факторів, але лише для окремих видів підземних об'єктів (паркінги, автомобільні тунелі – підрозділ 6.3). Комплексне врахування містобудівних умов, що впливають на організацію підземного простору може дозволити розглянути більш загальну задачу планування підземних територій міста. Звичайно, така розширена задача потребуватиме використання вдосконаленої мережі морфологічних таблиць

порівняно з попередніми дослідженнями. Пропонується наступний вигляд мережі морфологічних таблиць (рис. 6.3):



Рисунок 6.3 – Мережа морфологічних таблиць оцінювання потенціалу територій підземного будівництва

Розглянемо окремо потенційний склад параметрів кожної з таблиць, що входять до мережі на рис. 6.3.

1. Функціонально-планувальна організація міського простору. Таблиця описує безпосередні характеристики як самої міської території, що розглядається, так і її місця в рамках функціонально-планувальної організації міста. Формування параметрів даної таблиці спирається на містобудівні умови [162] і може містити наступні параметри, які оцінюються або визначаються безпосередньо:

- функціонально-планувальна організація міського простору (компактна, лінійна, розчленована, роззосереджена);
- фактор середмістя (віддаленість від центру міста, віддаленість від границі міста);
- ландшафтні умови (рельєф, водні об'єкти, паркові зони);
- схема транспортно-планувальних умов (радіальна, радіально-кільцева, прямокутна, прямокутно-діагональна, трикутна, гексагональна, вільна);
- середня швидкість руху транспорту;
- пасажиропотік громадського транспорту (метро, автобус, тролейбус, трамвай, немає поблизу);

- тип забудови (житлова, громадська, розважально-торгівельні центри, промислова, транспортно-складська, природні зони відпочинку, незабудовані території);
- архітектурно-історична цінність об'єктів (наявність і кількість пам'яток);
- наявність вже існуючих підземних об'єктів і споруд;
- щільність забудови;
- щільність населення (кількість сталих мешканців);
- кількість робочих місць;
- рівень промислових і транспортних шкідливих викидів;
- тощо.

Таким чином, приблизний вигляд цієї морфологічної таблиці представлений в табл. 6.21.

Варто зазначити, що згідно з процедурою модифікованого морфологічного аналізу для кожного параметра визначається оцінка кожної з його альтернатив, що дозволяє створювати комбіновані описи умов – наприклад, змішані типи функціонально-планувальної організації міського простору. За схожим принципом оцінюються параметри, які важко визначити точно (наприклад, щільність населення, кількість робочих місць); метод передбачає використання нечітких значень параметрів морфологічної таблиці.

Таблиця 6.21 – Морфологічна таблиця функціонально-планувальної організації міського простору

S1. Організація міського простору	S2. Віддаленість від центру міста	S3. Віддаленість від границі міста	S4. Водні об'єкти
S1.1 Компактна	S2.1. Центр	S3.1. Гранична зона (0-0,1L ¹)	S4.1. Немає впливу у визначеному околі
S1.2 Лінійна	S2.2. Території наближені до центру (зона середмістя)	S3.2. Невелика відстань (0,1-0,3L)	S4.2. Малі річки
S1.3. Розчленована	S2.3. Проміжні території наближені до периферійної зони	S3.3. Середня відстань (0,3-0,6L)	S4.3. Малі озера, ставки
S1.4. Розсосереджена	S2.4. Периферійна зона	S3.4. Велика відстань (0,6-1L)	S4.4. Берегова зона великих річок, озер, морів
S5. Лісопаркові зони	S6. Схема транспортно-планувальних умов	S7. Середня швидкість руху транспорту	S8. Тип громадського транспорту
S5.1. Відсутні	S6.1. Радіальна	S7.1. Висока (більше 50 км/год)	S8.1. Немає у визначеному околі
S5.2. Невеликі обладнані парки, сквери	S6.2. Радіально-кільцева	S7.2. Середня (30-50 км/год)	S8.2. Метро
S5.3. Паркові зони	S6.3. Прямокутна	S7.3. Повільна (15-30 км/год)	S8.3. Автобус
S5.4. Лісові зони	S6.4. Прямокутно-діагональна	S7.4. Низька (менше 15 км/год)	S8.4. Тролейбус
	S6.5. Трикутна		S8.5. Трамвай
	S6.6. Гексагональна		
	S6.7. Вільна		
S9. Тип забудови	S10. Архітектурно-історична цінність	S11. Наявність вже існуючих підземних об'єктів і споруд	S12. Щільність забудови
S9.1. Житлова	S10.1. Незначна	S11.1. Відсутні	S12.1. Дуже низька
S9.2. Громадська	S10.2. Одиначні пам'ятки	S11.2. Тунельні комунікації	S12.2. Низька
S9.3. Розважально-торгівельні центри	S10.3. Значна кількість пам'яток	S11.3. Станції метрополітену, паркінги та пов'язані споруди	S12.3. Середня
S9.4. Промислова	S10.4. Весь визначений окіл	S11.4. Підземні торговельно-розважальні комплекси	S12.4. Висока
S9.5. Транспортно-складська			
S9.6. Зони відпочинку			
S9.7. Незабудовані території			
S13. Щільність населення		S14. Кількість робочих місць	S15. Рівень промислових і транспортних шкідливих викидів
S13.1. До 1000		S14.1. До 500	S15.1. Дуже низький
S13.2. 1000–3000		S14.2. 500–1000	S15.2. Низький
S13.3. 3000–6000		S14.3. 1000–3000	S15.3. Середній
S13.4. 6000–10000		S14.4. 3000–5000	S15.4. Високий
S13.5. Більше 10000		S14.5. Більше 5000	S15.5. Дуже високий

2. Аналіз структурно-функціональних факторів. Таблиця описує ділянку з точки зору факторів, які є похідними відносно першої таблиці, тобто визначаються на основі базових характеристик із таблиці 6.21 за допомогою

¹ L – відстань від границі до центру міста (будівлі головноштамту)

двоетапної процедури модифікованого методу морфологічного аналізу. Таблиця допомагає отримати розширене представлення про ділянку, потенціал її використання. Ця таблиця може містити наступні параметри:

- тип зони: сельбищна, виробнича, ландшафтно-рекреаційна, ділові та торгівельно-розважальні центри (ТРЦ);
- близькість до центру міста (у самому центрі, в середмісті, в проміжній зоні, на межевій периферії), або відносна відстань до центру (відношення відстані до центру до дистанції між центром і межею міста в цьому напрямку);
- потенціал території (розподіл ваг чинників привабливості цієї території) для підземного будівництва;
 - близькість до великих ТРЦ;
 - близькість до транспортних вузлів (транспортних комунікацій);
 - архітектурно-історичне значення території;
 - екологічний чинник;
 - соціальний чинник (щільність населення, якість забудови, робочі місця, соціальне забезпечення, інженерно-технічне забезпечення);
 - безпековий чинник (захист населення та критичної інфраструктури від воєнних і терористичних загроз).

Приблизний вигляд цієї морфологічної таблиці представлений в табл. 6.22.

Таблиця 6.22 – Морфологічна таблиця аналізу структурно-функціональних факторів

F1. Тип зони	F2. Розташування	F3. Потенціал території
F1.1. Сельбищна	F2.1. Центр	F3.1. Близькість до центру
F1.2. Виробнича	F2.2. Середмістя	F3.2. Близькість до великих ТРЦ
F1.3. Ландшафтно-рекреаційна	F2.3. Проміжна зона	F3.3. Близькість до транспортних вузлів
F1.4. ТРЦ	F2.4. Периферійна зона	F3.4. Архітектурно-історичне значення території
		F3.5. Екологічний чинник
		F3.6. Соціальний чинник
		F3.7. Безпековий чинник

3. Геологічне середовище. В таблиці враховуються безпосередні характеристики геологічного середовища, які можуть бути оцінені експертним шляхом, якщо аналіз проводиться на передпроектній стадії будівництва. Пропонується використати морфологічну таблицю інженерно-геологічних факторів з підрозділу 6.2, параметрами якої є (табл. 6.23):

- рівень динамічного навантаження;
- показник статичного навантаження від поверхневої забудови;
- показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву;
- вплив існуючих підземних об'єктів;
- генетичний тип та літологічний склад ґрунтів;
- розрахунковий опір ґрунту;
- вплив водоносних горизонтів і верховодки;
- тип рельєфу і морфометрія;
- інженерно-геологічні процеси;
- геотехнології будівництва підземних споруд.

4. Аналіз інженерно-геологічних факторів. В таблиці на основі модифікованого методу морфологічного аналізу отримується висновок відносно придатності ділянки з точки зору інженерно-геологічних факторів і пов'язаних з ними ризиків. Тут також пропонується використати морфологічну таблицю з попередніх досліджень, параметрами якої є (табл. 6.24):

- придатність ділянки (з точки зору інженерно-геологічних факторів);
- доцільний масштаб підземного об'єкту;
- доцільна глибина забудови;
- фактори ризику, пов'язані з інженерно-геологічними факторами (розподіл ваг між різними групами ризику);
- ступінь та рівень ризику при підземному будівництві.

Таблиця 6.23 – Морфологічна таблиця інженерно-геологічних факторів

Параметр	Альтернативи параметра
G1. Рівень динамічного навантаження	G1.1. Низький (46 – 53 дБ)
	G1.2. Середній (53 – 73 дБ)
	G1.3. Підвищений (73 – 96 дБ)
	G1.4. Високий (більше 96 дБ)
G2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови	G2.1. Незначний ($K_{ст} < 1$)
	G2.2. Помірний ($1 < K_{ст} < 2$)
	G2.3. Відносно високий ($2 < K_{ст} < 3,5$)
	G2.4. Високий ($K_{ст} > 3,5$)
G3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву	G3.1. Незначний ($K_{мас} < 0,05$, Мпа)
	G3.2. Помірний ($0,05 < K_{мас} < 0,3$, Мпа)
	G3.3. Високий ($0,3 < K_{мас} < 0,5$, Мпа)
	G3.4. Вельми високий ($K_{мас} > 0,5$, Мпа)
G4. Вплив існуючих підземних об'єктів	G4.1. Відсутній (відстань понад 50 м)
	G4.2. Незначний (відстань 20 – 50 м)
	G4.3 Впливовий (відстань 10 – 20 м)
	G4.4 Загрозливий (відстань ближче 10 м)
G5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів	G5.1. Невітриті глини та піски середньої щільності
	G5.2. Техногенні відклади (намівні та насипні ущільнені різновиди)
	G5.3. Делювіальні глинисті ґрунти (водонасичені), обводнені надзаплавні піски
	G5.4. Просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул)
G6. Розрахунковий опір ґрунту	G6.1. Дуже міцні ґрунтові основи > 300 кПа
	G6.2. Міцні 200-300 кПа
	G6.3. ґрунти середньої міцності 150-200 кПа
	G6.4. Відносно міцні ґрунти < 150 кПа
G7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки	G7.1. Водоносні горизонти у Р-N _{1пр}
	G7.2. Глибина залягання ґрунтових вод > 3 м, напірних > 10 м
	G7.3. Глибина залягання ґрунтових вод < 3 м, напірних < 10 м
	G7.4. Наявні підтоплення та/або пливуні
G8. Тип рельєфу і морфометрія	G8.1. Плaskі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини (нахил поверхні до 1°)
	G8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів (нахил поверхні $1-4^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $0-2$ км/км ²)
	G8.3. Долини малих річок, слабо розчленовані схили, висока заплава (нахил поверхні $4-8^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $2-3$ км/км ²)
	G8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава (нахил поверхні $> 8^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $3-4$ км/км ²)
G9. Інженерно-геологічні процеси	G9.1. Відсутні
	G9.2. Процеси застабілізовані
	G9.3. Прояв зсувних зміщень незначних об'ємів
	G9.4. Активний прояв просідання, підтоплення, гравітаційних процесів
G10. Геотехнології будівництва підземних споруд	G10.1. Відкриті
	G10.2. Підземні

Таблиця 6.24 – Морфологічна таблиця аналізу інженерно-геологічних факторів

Параметр	Альтернативи параметра
U1. Придатність ділянки	U1.1. Придатна
	U1.2. Непридатна
U2. Площа перерізу підземного об'єкта	U2.1. Площа перерізу до 10 м ²
	U2.2. Площа перерізу до 25 м ²
	U2.3. Площа перерізу до 40 м ²
	U2.4. Площа перерізу понад 40 м ²
U3. Протяжність підземного об'єкта	U3.1. До 50 м
	U3.2. 50-200 м
	U3.3. 200-1000 м
	U3.4. Понад 1000 м
U4. Рівень підземної забудови	U4.1. 0–10 м
	U4.2. 10–20 м
	U4.3. 20–60 м
	U4.4. глибше 60 м
U5. Фактор ризику	U5.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності
	U5.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд
	U5.3. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти
	U5.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів
U6. Ступінь ризику	U6.1. <3%
	U6.2. 3–10%
	U6.3. 10–20%
	U6.4. 20–50%
	U6.5. >50%
U7. Рівень ризику	U7.1. 0,1–5% Q ²
	U7.2. 5–20% Q
	U7.3. 20–50% Q
	U7.4. >50% Q

5. Використання потенціалу підземного будівництва. Узагальнені рішення по території в рамках структурно-функціонального планування підземного простору, які оцінюються на основі аналізу структурно-функціональних та інженерно-геологічних факторів. В якості елементів рішення можуть бути використані наступні параметри:

- об'єкти суспільного призначення – підземні ТРЦ, спортивні, культурні, рекреаційні об'єкти;
- об'єкти транспортного призначення: метрополітен, автомобільні тунелі, автостоянки/гаражі/паркінги, гідротехнічні та інженерні комунікації;
- об'єкти подвійного призначення (сховища цивільної безпеки як друга функція);

² Q – вартість будівництва підземної споруди (включно з матеріалами й усіма видатками)

- масштаб споруди (розміри, просторова організація: однорівнева, багаторівнева);
- можливий рівень інтегрованості з наземною забудовою й транспортною системою;
- можливий рівень інтегрованості з існуючими підземними спорудами.

Приблизний вигляд цієї морфологічної таблиці представлений в табл. 6.25.

Таблиця 6.25 – Морфологічна таблиця використання потенціалу підземного будівництва

D1. Об'єкти суспільного призначення	D2. Об'єкти транспортного призначення	D3. Об'єкти промислового та енергетичного призначення	D4. Потенціал використання як об'єкту подвійного призначення (захист населення та критичної інфраструктури)
D1.1. Недоцільні	D2.1. Метрополітен	D3.1. Підземні заводи	D4.1. Мінімальний
D1.2. Підземні ТРЦ	D2.2. Автомобільні тунелі	D3.2. Підземні електростанції	D4.2. Обмежений
D1.3. Спортивні, культурні об'єкти	D2.3. Автостоянки/гаражі/паркінги, залізничні вокзали	D3.3. Окремі підземні об'єкти наземних підприємств	D4.3. Суттєвий
D1.4. Рекреаційні об'єкти	D2.4. Гідротехнічні та інженерні комунікації		
D5. Просторова організація	D6. Можливий рівень інтегрованості з наземною забудовою	D7. Можливий рівень інтегрованості з існуючими підземними спорудами	
D5.1. Однорівнева	D6.1. Мінімальний	D7.1. Мінімальний	
D5.2. Багаторівнева	D6.2. Обмежений	D7.2. Обмежений	
	D6.3. Суттєвий	D7.3. Суттєвий	

Таким чином, проведення процедури модифікованого морфологічного аналізу для всієї мережі з рис. 6.3 дозволяє на основі безпосередньо спостережуваних або оцінюваних характеристик проводити аналіз і нечітку класифікацію територій за структурно-функціональними і інженерно-геологічними факторами, і отримувати пріоритети альтернатив рішень щодо використання ділянки у підземному будівництві з різною метою.

Окремо слід зазначити потенціал для інтеграції з геоінформаційними системами. При автоматизованому або напівавтоматизованому отриманні вхідних оцінок для таблиць 6.21 і 6.23 процедура модифікованого методу морфологічного аналізу може бути використана для побудови «температурної карти» доцільності будівництва різних типів підземних об'єктів у межах міста, виділяючи найбільш перспективні ділянки для спорудження тих чи інших об'єктів.

Висновки за розділом 6

1. Розроблено стратегію використання різних процедур МММА в процесі сценарного аналізу, що деталізує способи і рамки застосування розроблених елементів методу в залежності від поставлених задач, характеристик вхідних даних.

2. Створено модель на основі МММА для порівняння ділянок потенційного підземного будівництва на передпроектній стадії на основі аналізу інженерно-геологічних факторів, пов'язаних із ділянкою. Модель використовує двоетапний МММА, де на першому етапі розглядаються 10 інженерно-геологічних параметрів, а на другому визначаються оцінки 6 параметрів, що описують рішення, в тому числі доцільність чи недоцільність будівництва, доцільні масштаби і рівень забудови, ризику, пов'язані з будівництвом, і їх характеристики.

3. Створені моделі на основі МММА для оцінювання пріоритетності побудови підземних споруд конкретного призначення, зокрема, паркінгів і автомобільних тунелів. Розглядаються мережі морфологічних таблиць, в яких присутні як інженерно-геологічні фактори із базової задачі, так і структурно-функціональні фактори, які характеризують ділянку з точки зору потреби у відповідному типі підземної споруди. Для оцінювання автомобільних тунелів створена також гібридна модель, що поєднує елементи МММА і методу аналізу ієрархій для формування ранжувань за альтернативною процедурою.

4. Розроблено прототип моделі на основі двоетапного МММА для порівняння урбаністичних об'єктів з точки зору їх протидії небажаним подіям. В моделі аналізуються характеристики небажаної події, і наслідки, які така подія може викликати для заданого типу урбаністичних об'єктів.

5. Як узагальнення розглянутих окремих задач, запропонована мережа морфологічних таблиць оцінювання потенціалу території підземного будівництва, яка синтезує функціонально-планувальну організацію міського простору та

інженерно-геологічні фактори геологічного середовища для територій, що розглядаються.

Матеріали розділу викладені в роботах [34, 35, 37, 70, 73, 82, 83, 135, 149–151, 160, 161].

РОЗДІЛ 7

РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ПЛАНУВАННІ ПІДЗЕМНОГО БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ТА БАГАТОФАКТОРНИХ РИЗИКІВ

7.1 Оцінювання придатності ділянок будівництва підземних об'єктів

Модель оцінювання інженерно-геологічних факторів (підрозділ 6.2) ділянок будівництва була використана для чотирьох ділянок м. Києва з різними характеристиками:

- 1) будівельний майданчик на проспекті Перемоги;
- 2) будівельний майданчик між вулицями Бульварно-Кудрявська та Гончара;
- 3) ділянка під Європейською площею;
- 4) ділянка між Софійською та Михайлівською площами.

Порівняння цих локацій підземних багатофункціональних комплексів дозволить ще на передпроектній стадії системно оцінити ризики та прийняти обґрунтовані рішення щодо вибору більш сприятливої ділянки будівництва, виходячи з інженерно-геологічного середовища розміщення об'єктів.

На основі опитувальних форм були отримані вхідні оцінки щодо кожної з ділянок (усього 38 питань по альтернативах 10 параметрів з табл. 6.3). Вхідні оцінки після нормування для альтернативи $a_j^{(i)}$ наведені в стовпчику $p_j^{(i)}$ табл. 7.1. Після проведення процедур МММА були отримані результуючі оцінки, що наведені в стовпчику $p_j^{(i)}$ тієї ж таблиці. Різниця в оцінках пояснюється урахуванням МВЗАП (табл. 6.5) для уточнення вхідних даних.

Таблиця 7.1 – Вхідні дані і розраховані оцінки альтернатив параметрів першої МТ

Альтернативи	Оцінки							
	Ділянка 1		Ділянка 2		Ділянка 3		Ділянка 4	
	$P_j^{(i)}$	$P_j^{(i)}$	$P_j^{(i)}$	$P_j^{(i)}$	$P_j^{(i)}$	$P_j^{(i)}$	$P_j^{(i)}$	$P_j^{(i)}$
1. Рівень динамічного навантаження								
1.1. Низький (46 – 53 дБ)	0,000	0,000	0,593	0,707	0,000	0,000	0,206	0,473
1.2. Середній (53 – 73 дБ)	0,194	0,388	0,259	0,263	0,194	0,396	0,471	0,471
1.3. Підвищений (73 – 96 дБ)	0,361	0,286	0,148	0,029	0,444	0,353	0,206	0,036
1.4. Високий (більше 96 дБ)	0,444	0,326	0,000	0,000	0,361	0,250	0,118	0,020
2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови								
2.1. Незначний ($K_{сн} < 1$)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,593	0,534	0,667	0,712
2.2. Помірний ($1 < K_{сн} < 2$)	0,000	0,000	1,000	1,000	0,259	0,400	0,167	0,233
2.3. Відносно високий ($2 < K_{сн} < 3,5$)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,148	0,066	0,167	0,055
2.4. Високий ($K_{сн} > 3,5$)	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву								
3.1. Незначний ($K_{мас} < 0,05$, Мпа)	0,351	0,030	0,432	0,324	0,485	0,185	0,433	0,167
3.2. Помірний ($0,05 < K_{мас} < 0,3$, Мпа)	0,351	0,717	0,351	0,639	0,394	0,766	0,433	0,799
3.3. Високий ($0,3 < K_{мас} < 0,5$, Мпа)	0,189	0,189	0,108	0,025	0,121	0,049	0,133	0,034
3.4. Вельми високий ($K_{мас} > 0,5$, Мпа)	0,108	0,063	0,108	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000
4. Вплив існуючих підземних об'єктів								
4.1. Відсутній (відстань понад 50 м)	0,000	0,000	0,800	0,714	0,129	0,034	0,432	0,359
4.2. Незначний (відстань 20 – 50 м)	0,800	0,479	0,200	0,286	0,226	0,156	0,351	0,505
4.3. Впливовий (відстань 10 – 20 м)	0,200	0,521	0,000	0,000	0,516	0,728	0,108	0,109
4.4. Загрозливий (відстань ближче 10 м)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	0,081	0,108	0,028
5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів								
5.1. Невивітрілі глини та піски	0,108	0,107	0,108	0,170	0,175	0,279	0,163	0,357
5.2. Техногенні відклади	0,351	0,372	0,351	0,450	0,325	0,402	0,372	0,572
5.3. Делювіальні глинисті ґрунти (водонасичені), обводнені надзаплавні піски	0,432	0,434	0,432	0,342	0,325	0,247	0,302	0,058
5.4. Просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул)	0,108	0,087	0,108	0,038	0,175	0,072	0,163	0,014
6. Розрахунковий опір ґрунту								
6.1. Дуже міцні ґрунтові основи > 300 кПа	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,028	0,100	0,028
6.2. Міцні 200-300 кПа	0,000	0,000	0,333	0,209	0,175	0,137	0,175	0,143
6.3. Ґрунти середньої міцності 150-200 кПа	0,200	0,352	0,533	0,670	0,325	0,437	0,400	0,539
6.4. Відносно міцні ґрунти < 150 кПа	0,800	0,648	0,133	0,120	0,400	0,399	0,325	0,290
7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки								
7.1. Водоносні горизонти у Р- $N_{1пр}$	0,000	0,000	0,143	0,098	0,118	0,089	0,206	0,230
7.2. Глибина залягання ґрунтових вод > 3 м, напірних > 10 м	0,121	0,384	0,571	0,672	0,382	0,458	0,471	0,654
7.3. Глибина залягання ґрунтових вод < 3 м, напірних < 10 м	0,485	0,552	0,143	0,126	0,382	0,359	0,206	0,090
7.4. Найвні підтоплені ділянки з РГВ до 1 м	0,394	0,065	0,143	0,104	0,118	0,094	0,118	0,026
8. Тип рельєфу і морфометрія								
8.1. Плоскі ділянки	0,571	0,476	0,000	0,000	0,108	0,299	0,351	0,596
8.2. Слабко нахилені поверхні	0,143	0,177	0,121	0,382	0,189	0,401	0,351	0,384
8.3. Долини малих річок, слабко розчленовані схили, висока заплава	0,143	0,275	0,394	0,476	0,351	0,246	0,108	0,017
8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів	0,143	0,072	0,485	0,142	0,351	0,055	0,189	0,003
9. Інженерно-геологічні процеси								
9.1. Відсутні	0,118	0,018	0,000	0,000	0,189	0,076	0,351	0,417
9.2. Процеси застabilізовані	0,382	0,346	0,256	0,507	0,432	0,529	0,432	0,551
9.3. Прояв незначних зсувних зміщень	0,382	0,559	0,410	0,467	0,189	0,320	0,108	0,030
9.4. Активний прояв просідання, підтоплення, гравітаційних процесів	0,118	0,077	0,333	0,025	0,189	0,075	0,108	0,003
10. Геотехнології будівництва підземних споруд								
10.1. Відкриті	0,350	0,281	0,448	0,634	0,800	0,941	0,800	0,971
10.2. Підземні	0,650	0,719	0,552	0,366	0,200	0,059	0,200	0,029

Результати другого етапу двоетапної процедури МММА наведені у табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Ваги альтернатив параметрів рішення щодо ділянки

Параметр	Альтернатива	Оцінка			
		Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 4
А. Придатність ділянки	A.1. Придатна	0,688	0,993	0,921	0,939
	A.2. Непридатна	0,312	0,007	0,079	0,061
В. Масштаб об'єкта	V.1. Площа перерізу до 10 м ²	0,722	0,454	0,401	0,207
	V.2. Площа перерізу до 35 м ²	0,241	0,303	0,297	0,312
	V.3. Площа перерізу до 70 м ²	0,033	0,201	0,174	0,307
	V.4. Площа перерізу до і більше 70 м ²	0,005	0,041	0,128	0,174
С. Рівень забудови	C.1. 0–10 м	0,053	0,261	0,281	0,520
	C.2. 10–20 м	0,143	0,307	0,277	0,308
	C.3. 20–50 м	0,439	0,309	0,422	0,165
	C.4. глибше 50 м	0,365	0,123	0,020	0,007
D. Фактор ризику	D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності	0,047	0,002	0,007	0,002
	D.2. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти	0,049	0,006	0,110	0,104
	D.3. Ініціація зсувних явищ	0,241	0,324	0,206	0,176
	D.4. Підтоплення	0,154	0,214	0,291	0,207
	D.5. Екологічні ризики	0,185	0,300	0,293	0,388
	D.6. Транспортні проблеми	0,122	0,081	0,029	0,083
	D.7. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд	0,202	0,073	0,065	0,040
E. Ступінь ризику	E.1. <3%	0,028	0,304	0,130	0,402
	E.2. 3–10%	0,502	0,625	0,655	0,450
	E.3. 10–20%	0,382	0,068	0,166	0,118
	E.4. 20–50%	0,072	0,003	0,047	0,031
	E.5. >50%	0,017	0,000	0,002	0,000
F. Рівень ризику	F.1. 0,1–5% Q	0,037	0,562	0,344	0,661
	F.2. 5–20% Q	0,789	0,422	0,624	0,287
	F.3. 20–50%Q	0,153	0,015	0,031	0,052
	F.4. >50% Q	0,020	0,000	0,001	0,000

Результати, отримані в табл. 7.2, зручніше представляти у вигляді діаграм і графіків (рис. 7.1–7.3). Аналіз результатів показує, що всі чотири ділянки є скоріше сприятливими, ніж несприятливими для підземного будівництва, хоча ділянка 1 суттєво відстає за цим показником, що пояснюється більш несприятливими геомеханічними умовами у її випадку. Третя і четверта ділянки мають певну перевагу для великих площ перерізу (які можуть бути використані в багатофункціональних підземних комплексах). Щодо глибини закладання, то певна перевага четвертої ділянки має місце при мілкому закладанні, а в діапазоні глибини 10–20 м рівень сприятливості ділянок 2–4 подібний. Помітна різниця спостерігається на глибині більше 50 м, де ділянка 1 має перевагу, що теж

пояснюється складністю її підземного освоєння, яка не сприяє будівництву споруд більш мілкого закладання.

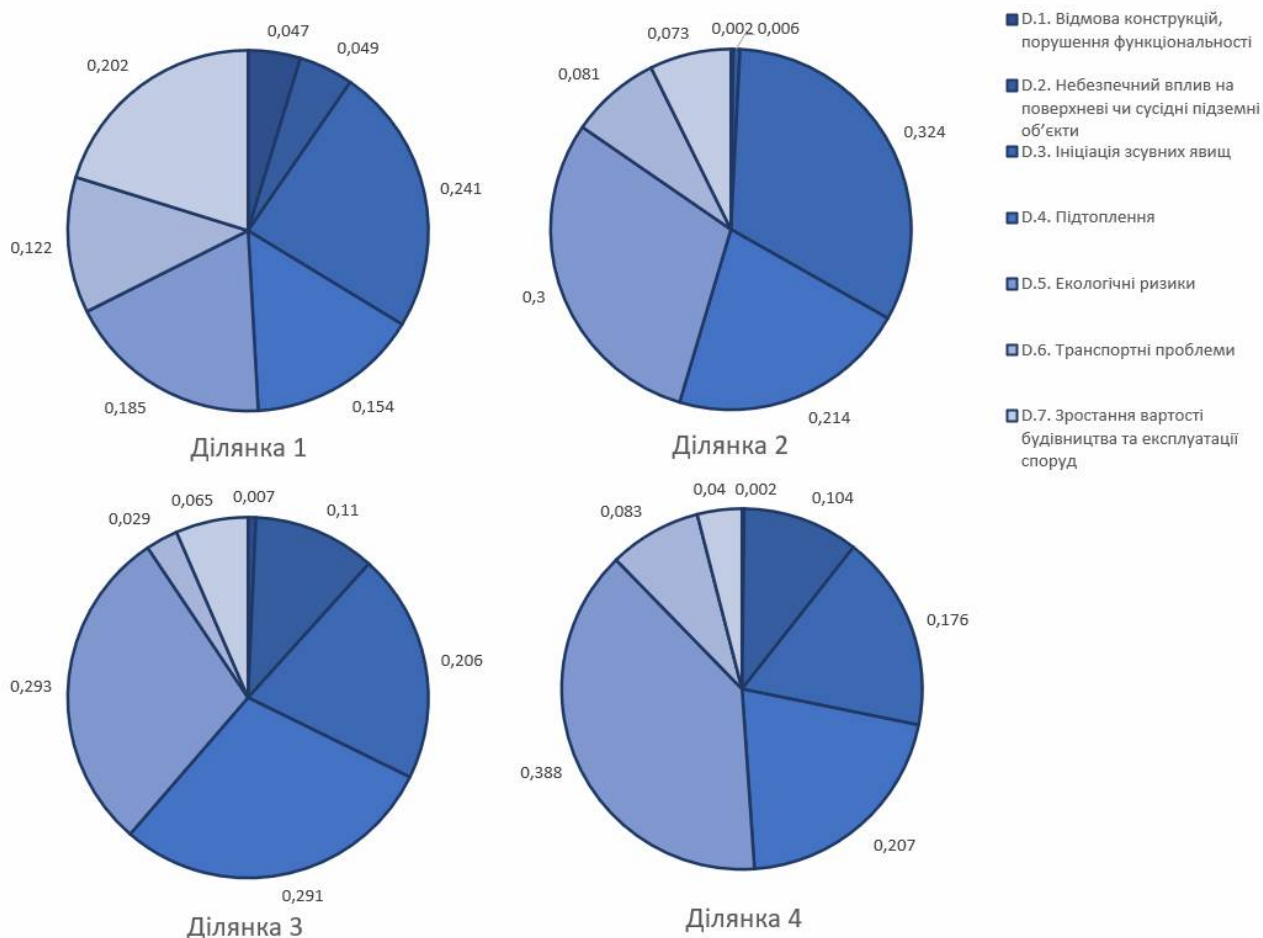


Рисунок 7.1 – Візуалізація параметра «D. Фактор ризику» для ділянок

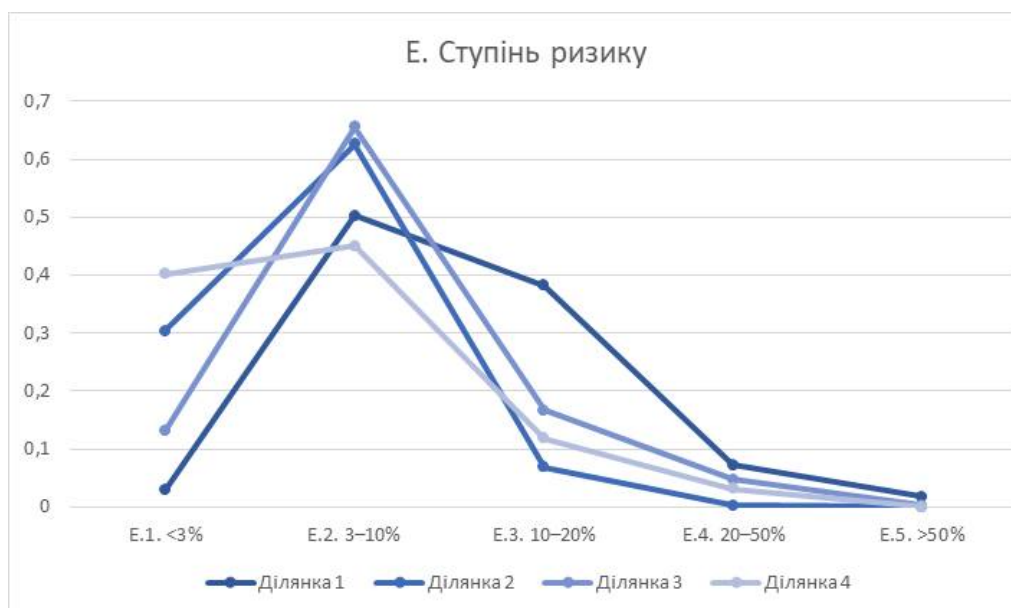


Рисунок 7.2 – Візуалізація параметра «E. Ступінь ризику» для ділянок

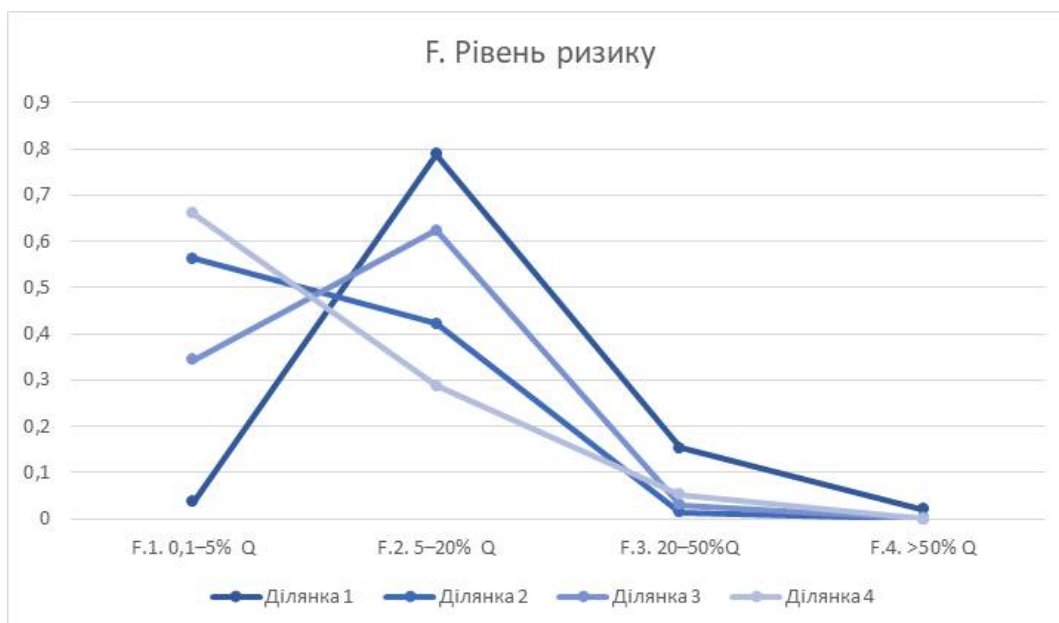


Рисунок 7.3 – Візуалізація параметра «F. Рівень ризику» для ділянок

Рис. 7.1 показує, які фактори ризику можуть стати найбільш критичними для досліджуваних ділянок підземного будівництва. Для перших двох ділянок суттєвим фактором є ініціація зсувних явищ через наявний вплив річки Либідь. Для ділянки 1 суттєвим чинником може стати зростання вартості будівництва та експлуатації споруд, що відображає менш сприятливі інженерно-геологічні умови для цієї ділянки. Для всіх ділянок досить значимим фактором ризику також є підтоплення, особливо для ділянки 3, що пояснюється тим, що поблизу Європейської площі починається струмок Хрещатик, узятий у підземний колектор. З рис. 7.2 видно, що для всіх ділянок найвищий ступінь реалізації (ймовірність ризику) лежить в діапазоні 3–10%, однак ділянки 2 і 4 мають більш високе ліве «плече» цього графіку, тобто тенденцію до менших ступенів ризику. Вірогідність високих і дуже високих ступенів ризику досить мала для всіх ділянок, хоча ділянка 1 і тут підтверджує свої менш сприятливі показники. Вартість економічних ризиків слід очікувати у діапазоні 0,1–5% від витрат на будівництво підземної споруди для ділянок 2 і 4, і 5–20% для ділянок 1 і 3, однак ще раз зазначимо, що їх ймовірність досить мала.

Таким чином, можна стверджувати, що хоча всі чотири розглянуті ділянки мають хороший потенціал для підземного будівництва, ділянки 2 і 4 можна

рекомендувати як більш пріоритетні, тоді як при створенні проєкту забудови ділянки 1 необхідно більш детально враховувати визначені ризики, аби запобігти негативним сценаріям.

7.1.1 Аналіз упередженості моделі

Розглянемо аналіз упередженості даної моделі і порівняємо з результатами, отриманими для ділянок 1 і 2. Згідно з процедурами, описаними в підрозділі 2.5, були отримані показники упередженості для першого етапу, наведені в табл. 7.3 в стовпчику $\tilde{p}_j^{(i)}$. Для зручності наведені також розраховані оцінки ділянок 1 і 2 з табл. 7.1.

Стовпчик $\tilde{p}_j^{(i)}$ показує середню картину інженерно-геологічних факторів, яка приблизно відповідає розподілу геомеханічних характеристик по м. Києву. На основі порівняння з розглянутими ділянками можна побачити, що результати розрахунку можуть суттєво відрізнятись від цих середніх значень за деякими показниками, де ці ділянки є особливими, в той час як по деяких показниках ділянки демонструють середньостатистичний рівень. В табл. 7.4 показана упередженість моделі відносно рішень (другого етапу МММА).

Таблиця 7.3 – Порівняння результатів першого етапу МММА для двох ділянок будівництва і упередженості моделі

Параметр	Альтернатива	Оцінки		
		Упередженість	Ділянка 1	Ділянка 2
		$\tilde{p}_j^{(i)}$	$p_j^{(i)}$	$p_j^{(i)}$
1. Рівень динамічного навантаження	1.1. Низький (46 – 53 дБ)	0,382	0,000	0,707
	1.2. Середній (53 – 73 дБ)	0,340	0,388	0,263
	1.3. Підвищений (73 – 96 дБ)	0,142	0,286	0,029
	1.4. Високий (більше 96 дБ)	0,136	0,326	0,000
2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови	2.1. Незначний ($K_{ст}<1$)	0,238	0,000	0,000
	2.2. Помірний ($1<K_{ст}<2$)	0,371	0,000	1,000
	2.3. Відносно високий ($2<K_{ст}<3,5$)	0,201	0,000	0,000
	2.4. Високий ($K_{ст}>3,5$)	0,189	1,000	0,000
3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву	3.1. Незначний ($K_{мас}<0,05$, Мпа)	0,094	0,030	0,324
	3.2. Помірний ($0,05<K_{мас}<0,3$, Мпа)	0,625	0,717	0,639
	3.3. Високий ($0,3<K_{мас}<0,5$, Мпа)	0,183	0,189	0,025
	3.4. Вельми високий ($K_{мас}>0,5$, Мпа)	0,098	0,063	0,012
4. Вплив існуючих підземних об'єктів	4.1. Відсутній (відстань понад 50 м)	0,195	0,000	0,714
	4.2. Незначний (відстань 20 – 50 м)	0,331	0,479	0,286
	4.3 Впливовий (відстань 10 – 20 м)	0,358	0,521	0,000
	4.4 Загрозливий (відстань ближче 10 м)	0,116	0,000	0,000
5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів	5.1. Невивітрілі глини та піски середньої щільності	0,490	0,107	0,170
	5.2. Техногенні відклади (намитві та насипні ущільнені різновиди)	0,317	0,372	0,450
	5.3. Делювіальні глинисті ґрунти (водонасичені), обводнені надзаплавні піски	0,133	0,434	0,342
	5.4. Просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул)	0,061	0,087	0,038
6. Розрахунковий опір ґрунту	6.1. Дуже міцні ґрунтові основи >300 кПа	0,174	0,000	0,000
	6.2. Міцні 200-300 кПа	0,311	0,000	0,209
	6.3. ґрунти середньої міцності 150-200 кПа	0,333	0,352	0,670
	6.4. Відносно міцні ґрунти <150 кПа	0,182	0,648	0,120
7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки	7.1. Водоносні горизонти у Р-N _{1пр}	0,341	0,000	0,098
	7.2. Глибина залягання ґрунтових вод > 3 м, напірних > 10 м	0,412	0,384	0,672
	7.3. Глибина залягання ґрунтових вод < 3 м, напірних < 10 м	0,170	0,552	0,126
	7.4. Наявні підтоплені ділянки з РГВ до 1м	0,078	0,065	0,104
8. Тип рельєфу і морфометрія	8.1. Плaskі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини	0,460	0,476	0,000
	8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів	0,372	0,177	0,382
	8.3. Долини малих річок, слабо розчленовані схили, висока заплава	0,142	0,275	0,476
	8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава	0,027	0,072	0,142
9. Інженерно-геологічні процеси	9.1. Відсутні	0,273	0,018	0,000
	9.2. Процеси застabilізовані	0,431	0,346	0,507
	9.3. Прояв зсувних зміщень незначних об'ємів	0,251	0,559	0,467
	9.4. Активний прояв просідання, підтоплення, гравітаційних процесів	0,044	0,077	0,025
10. Геотехнології будівництва підземних споруд	10.1. Відкриті	0,669	0,281	0,634
	10.2. Підземні	0,331	0,719	0,366

Таблиця 7.4 – Порівняння результатів другого етапу МММА для двох ділянок будівництва і упередженості моделі

Параметр	Альтернатива	Оцінка		
		Упередженість	Ділянка 1	Ділянка 2
А. Придатність ділянки	A.1. Придатна	0,942	0,688	0,993
	A.2. Непридатна	0,058	0,312	0,007
В. Масштаб об'єкта	B.1. Площа перерізу до 10 м ²	0,402	0,722	0,454
	B.2. Площа перерізу до 35 м ²	0,294	0,241	0,303
	B.3. Площа перерізу до 70 м ²	0,238	0,033	0,201
	B.4. Площа перерізу до і більше 70 м ²	0,066	0,005	0,041
С. Рівень забудови	C.1. 0–10 м	0,194	0,053	0,261
	C.2. 10–20 м	0,259	0,143	0,307
	C.3. 20–50 м	0,370	0,439	0,309
	C.4. глибше 50 м	0,177	0,365	0,123
D. Фактор ризику	D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності	0,008	0,047	0,002
	D.2. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти	0,020	0,049	0,006
	D.3. Ініціація зсувних явищ	0,168	0,241	0,324
	D.4. Підтоплення	0,163	0,154	0,214
	D.5. Екологічні ризики	0,393	0,185	0,300
	D.6. Транспортні проблеми	0,145	0,122	0,081
	D.7. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд	0,103	0,202	0,073
E. Ступінь ризику	E.1. <3%	0,320	0,028	0,304
	E.2. 3–10%	0,548	0,502	0,625
	E.3. 10–20%	0,114	0,382	0,068
	E.4. 20–50%	0,014	0,072	0,003
	E.5. >50%	0,003	0,017	0,000
F. Рівень ризику	F.1. 0,1–5% Q	0,543	0,037	0,562
	F.2. 5–20% Q	0,426	0,789	0,422
	F.3. 20–50% Q	0,029	0,153	0,015
	F.4. >50% Q	0,002	0,020	0,000

З табл. 7.4 видно, що модель в принципі упереджена щодо доцільності будівництва, тобто випадковим чином взята ділянка, ймовірно, буде придатною до підземного будівництва з точки зору геологічних факторів, що в певній мірі відповідає дійсності. Тому ділянка 1, яка отримала досить високі ваги щодо придатності будівництва (альтернатива «A.1. Придатна» має вагу 0,688), насправді може виявитись гіршою за середню ділянку. У той час як ділянка 2, навпаки, виявилась кращою за середню. За ступенем і рівнем ризику також видно, що середня ділянка має ваги найнижчих ступеня і рівня ризику 0,32 і 0,543 відповідно, при цьому ділянка 2 отримала приблизно такі значення (0,304 і 0,562), тобто в плані ступеня і рівня ризику ця ділянка не виділяється; з іншого боку, ділянка 1 отримала значення цих альтернатив, рівні відповідно 0,028 і 0,037, тобто її профіль з точки зору ризику набагато гірший, ніж для деякої середньостатистичної ділянки.

7.1.2 Виявлення протиріч у матриці взаємозв'язків

Для моделі оцінювання інженерно-геологічних факторів будівництва також було проведено процедуру виявлення протиріч у МВЗАП, наведену в підрозділі 2.3. Аналізувалась МВЗАП, представлена в табл. 6.5, в якій із 368 ненульових значень тестувались 209 додатних. Для кожного такого значення $C_{i_1j_1, i_2j_2}$ шукалась альтернатива $a_k^{(z)}$, яка призводила до найбільшого порушення нерівності (2.38), яке позначалось як $\Delta_{i_1j_1, i_2j_2}^{\max}$, де $\Delta_{i_1j_1, i_2j_2}^{\max} = 2(1 - C_{i_1j_1, i_2j_2}) - |C_{i_1j_1, zk} - C_{i_2j_2, zk}|$. Після цього значення МВЗАП відносились до однієї з 4 груп:

1) *безпечні*. Нерівність (2.38) виконується, $\Delta_{i_1j_1, i_2j_2}^{\max} \geq 0$. Протиріч із цим значенням не виявлено;

2) *допустимі*: $-0,5 \leq \Delta_{i_1j_1, i_2j_2}^{\max} < 0$. Присутні трійки значень МВЗАП, де є незначне протиріччя, яке може бути пояснене дискретністю шкали оцінювання;

3) *сумнівні*: $-1 \leq \Delta_{i_1j_1, i_2j_2}^{\max} < -0,5$. Є трійки значень МВЗАП із видимим протиріччям. Рекомендується додаткове дослідження;

4) *протирічні*: $\Delta_{i_1j_1, i_2j_2}^{\max} < -1$. Присутня трійка значень із очевидним протиріччям. Вкрай рекомендується додаткове дослідження.

Результати перевірки зведені в табл. 7.5:

Таблиця 7.5 – Результати тестування на протиріччя у МВЗАП

Категорія	Кількість	%
Безпечні	118	56,46%
Допустимі	38	18,18%
Сумнівні	26	12,44%
Протирічні	27	12,92%

Тестування показало, що майже три чверті значень МВЗАП або повністю узгоджені, або можуть бути пояснені дискретністю шкали оцінювання. Однак, частину оцінок необхідно було додатково проаналізувати на систематичні помилки. Аналіз найбільш неузгоджених оцінок виявив суттєве протиріччя між

альтернативами $\{a_4^{(3)}, a_4^{(5)}, a_1^{(6)}\}$: вельми високий показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву; просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул); дуже міцні ґрунтові основи. В той час як перша і друга, перша і третя альтернативи позначені як сильно залежні, друга і третя позначені як взаємовиключні. Цей приклад показав, що хоча модель в цілому досить узгоджена, деякі випадки протирічних оцінок потрібно вивчити окремо, оскільки неузгодженості можуть стосуватись як помилок експерта, так і розгляду неоднакових аспектів параметрів і альтернатив при формуванні МВЗАП.

7.2 Визначення пріоритетності ділянок будівництва підземних паркінгів

З використанням моделі, описаної в п. 6.3.1, був проведений аналіз структурно-функціональних факторів для ділянок 1 і 2 з підрозділу 7.1. Оцінки, отримані від експертів для МТ «І. Характеристика ділянки» для обох ділянок, наведені в табл. 7.6.

Наступним кроком розрахунку відповідно до мережі морфологічних таблиць, наведеної на рис. 6.1, було врахування зв'язків між МТ «І. Характеристика ділянки» і «ІІ. Результати аналізу ділянки». Таким чином були отримані результати, що описують розмір і тип потенційної потреби у паркомісцях для обох ділянок (табл. 7.7).

З табл. 7.7 видно, що ділянки дуже схожі за запитом на паркомісця, з незначним зміщенням ділянки 1 в сторону більших розмірів паркінгу.

Оцінювання геологічного середовища цих ділянок проводилось у підрозділі 7.1 (табл. 7.2). Згідно з розробленою морфологічною моделлю (п. 6.3.1), використовуються тільки результати параметрів А–С. На основі цих даних, і оцінок з табл. 7.6, 7.7 були розраховані оцінки параметрів рішень щодо ділянок (табл. 7.8).

Таблиця 7.6 – Вхідні дані для морфологічної таблиці «І. Характеристика ділянки»

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Ділянка 1	Ділянка 2
1. Урбаністичні об'єкти	1.1. Житлова забудова	0,242	0,184
	1.2. Офісні та адміністративні будівлі	0,242	0,184
	1.3. Торгівельні та розважальні центри	0,197	0,184
	1.4. Стадіони, концертні зали, театри	0,197	0,149
	1.5. Середні та вищі навчальні заклади	0,061	0,149
	1.6. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти	0,000	0,149
	1.7. Промислові підприємства	0,061	0,000
2. Кількість мешканців	2.1. До 1000	0,000	0,091
	2.2. 1000...3000	0,206	0,295
	2.3. 3000...6000	0,471	0,364
	2.4. 6000...10000	0,206	0,159
	2.5. Більше 10000	0,118	0,091
3. Кількість робочих місць	3.1. До 500	0,175	0,100
	3.2. 500...1000	0,400	0,325
	3.3. 1000...3000	0,325	0,400
	3.4. 3000...5000	0,100	0,175
	3.5. Більше 5000	0,000	0,000
4. Швидкість руху автотранспорту	4.1. Висока (більше 60 км/год)	0,206	0,163
	4.2. Середня (30...60 км/год)	0,471	0,302
	4.3. Низька (15...30 км/год)	0,206	0,372
	4.4. Дуже низька (менше 15 км/год)	0,118	0,163
5. Існуючі паркомісця	5.1. До 50 п/м	0,593	0,400
	5.2. 50...200 п/м	0,259	0,325
	5.3. 200...400 п/м	0,148	0,175
	5.4. Більше 400 п/м	0,000	0,100
6. Доступність будівельних територій	6.1. Без ускладнень	0,485	0,361
	6.2. Невеликі ускладнення	0,394	0,444
	6.3. Суттєві ускладнення	0,121	0,194

Таблиця 7.7 – Оцінена морфологічна таблиця «ІІ. Результати аналізу ділянки»

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Ділянка 1	Ділянка 2
7. Необхідність у паркомісцях	7.1. До 50 п/м	0,306	0,379
	7.2. 50...200 п/м	0,407	0,390
	7.3. 200...400 п/м	0,206	0,179
	7.4. Більше 400 п/м	0,080	0,053
8. Тип потреби у паркомісцях	8.1. Постійна	0,272	0,275
	8.2. Маятникова	0,375	0,372
	8.3. Пікова	0,352	0,354

Таблиця 7.8 – Оцінена морфологічна таблиця «IV. Рішення щодо ділянки»

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Ділянка 1	Ділянка 2
А. Доцільність будівництва паркінгу	А.1. Будівництво доцільне	0,853	0,979
	А.2. Будівництво недоцільне	0,147	0,021
В. Доцільний розмір паркінгу	В.1. До 50 п/м	0,429	0,355
	В.2. 50...200 п/м	0,444	0,456
	В.3. 200...400 п/м	0,121	0,160
	В.4. Більше 400 п/м	0,007	0,028

На основі табл. 7.8 можна зробити висновок, що обидві ділянки є достатньо сприятливими для будівництва (альтернатива «А.1. Будівництво доцільне» суттєво випереджає «А.2. Будівництво недоцільне»). Це пояснюється розташуванням об'єктів ділянок у соціально активних районах міста, неподалік від бізнес-центрів, ТРЦ, навчальних закладів. Оскільки ділянка 1 має гірші інженерно-геологічні умови, що було показано в підрозділі 7.1, її результуюча оцінка виявилась дещо нижче, і крім того, модель рекомендує для неї менші розміри паркінгу, оскільки менші перерізи підземних споруд сприяють їх стійкості.

7.3 Дослідження впливу побудови автомобільних тунелів на зменшення ризиків різного типу

В цьому підрозділі наводиться використання моделі, описаної в п. 6.3.2 для оцінювання пріоритетності будівництва автомобільних тунелів.

7.3.1 Експеримент зі штучним підвищенням ймовірності пливуна в моделі

Враховуючи, що в дослідженні аналізується придатність ділянки саме для протяжних тунелів, особливу увагу було приділено параметру 7 з табл. 6.3 (Вплив водоносних горизонтів і верховодки), зокрема його альтернативі 7.4 («Наявні підтоплення та/або пливуні»). Були оцінені зв'язки з цією альтернативою,

оскільки у випадку будівництва тунелів висока ймовірність цієї альтернативи різко підвищує ризики, пов'язані з будівництвом і суттєво знижує привабливість ділянки.

Для тестування цих змін було взято одну з ділянок попереднього дослідження (ділянка 2 з підрозділу 7.1), і в ній штучно внесено підвищення ймовірності пливуну. Решта оцінок альтернатив залишились незмінними. В табл. 7.9 показано, як зміни в матриці взаємозв'язків вплинули на результат, зокрема для альтернативи «А. Придатність ділянки».

Таблиця 7.9 – Експеримент зі штучним підвищенням ймовірності альтернативи «Наявні підтоплення та/або пливуну»

Низька ймовірність пливуну (безпечна ділянка)				
Оцінки параметра «7.4. Наявні підтоплення та/або пливуну»	Стара модель		Нова модель	
	{0,2; 0,8; 0,2; 0,2}	А.1. Придатна	0,993	А.1. Придатна
А.2. Непридатна		0,007	А.2. Непридатна	0,102
Підвищена ймовірність пливуну (ризикована ділянка)				
Оцінки параметра «7.4. Наявні підтоплення та/або пливуну»	Стара модель		Нова модель	
	{0,2; 0,5; 0,5; 0,5}	А.1. Придатна	0,987	А.1. Придатна
А.2. Непридатна		0,013	А.2. Непридатна	0,232
Висока ймовірність пливуну (небезпечна ділянка)				
Оцінки параметра «7.4. Наявні підтоплення та/або пливуну»	Стара модель		Нова модель	
	{0,2; 0,2; 0,2; 0,8}	А.1. Придатна	0,981	А.1. Придатна
А.2. Непридатна		0,019	А.2. Непридатна	0,502

З табл. 7.9 видно, що нова модель, на відміну від старої, більш адекватно реагує на збільшення ймовірності пливуну в геологічному середовищі, істотно зменшуючи вагу альтернативи «А.1. Придатна» навіть для дуже сприятливої з точки зору всіх інших альтернатив ділянки. Тут також потрібно зазначити, що через те, що зміни в параметрі 7 були штучними, виникала певна невідповідність між цим параметром і іншими, тому на першому етапі МММА модель намагалась «виправити» штучні збурення, частково нівелюючи їх. Незважаючи на це, експеримент явно показує більшу відповідність нової моделі поставленій задачі.

7.3.2 Результати тестування альтернативних ділянок потенційного будівництва тунелів

Для тестування розробленої моделі використовувались дві ділянки потенційного будівництва тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва [138] – тунель №1 (Ботанічний сад – Дарницький міст) і тунель №5 (частина Площа Перемоги – Дніпро) з рис. 7.4.

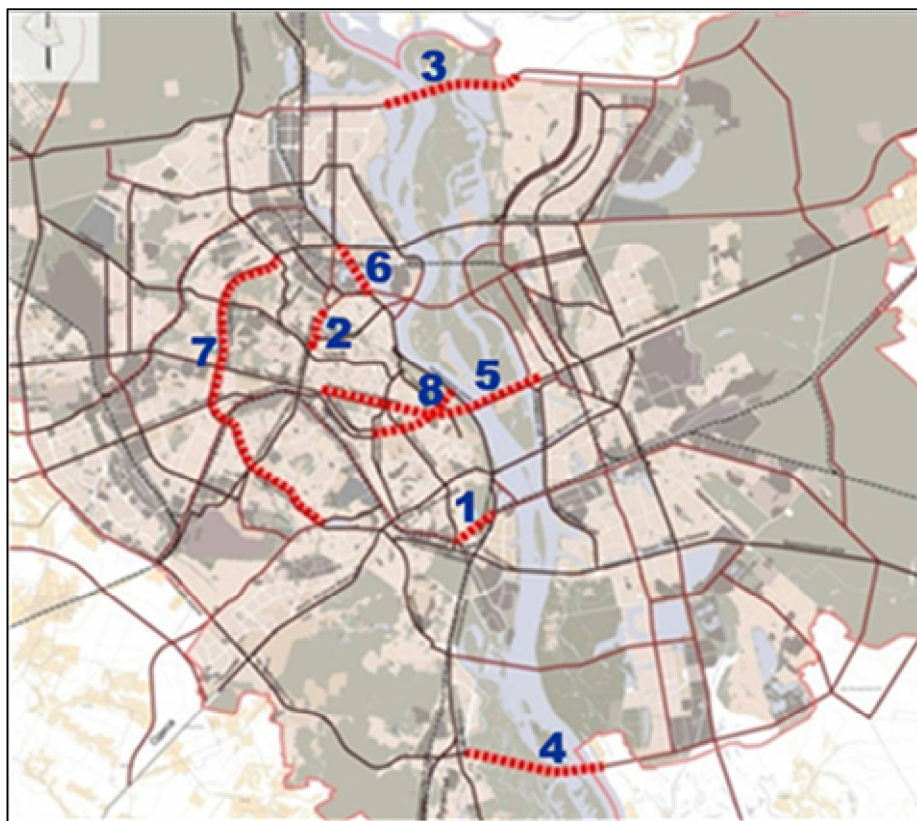


Рисунок 7.4 – Трасування автомобільних тунелів у Генеральному плані м. Київ

Результати експертного оцінювання даних геологічного середовища (табл. 6.3), і уточнені оцінки за процедурою першого етапу МММА наведені в табл. 7.10.

Таблиця 7.10 – Оцінки геологічного середовища для трас двох тунелів

Параметр	Альтернативи параметра	Тунель 1		Тунель 5	
		Вхід	Розр.	Вхід	Розр.
1. Рівень динамічного навантаження	1.1. Низький (46 – 53 дБ)	0,143	0,137	0,093	0,070
	1.2. Середній (53 – 73 дБ)	0,327	0,489	0,302	0,448
	1.3. Підвищений (73 – 96 дБ)	0,327	0,238	0,372	0,299
	1.4. Високий (більше 96 дБ)	0,204	0,136	0,233	0,182
2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови	2.1. Незначний ($K_{сн} < 1$)	0,206	0,101	0,000	0,000
	2.2. Помірний ($1 < K_{сн} < 2$)	0,471	0,584	0,194	0,164
	2.3. Відносно високий ($2 < K_{сн} < 3,5$)	0,206	0,215	0,444	0,451
	2.4. Високий ($K_{сн} > 3,5$)	0,118	0,100	0,361	0,385
3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву	3.1. Незначний ($K_{мас} < 0,05$, Мпа)	0,175	0,063	0,093	0,015
	3.2. Помірний ($0,05 < K_{мас} < 0,3$, Мпа)	0,400	0,703	0,302	0,485
	3.3. Високий ($0,3 < K_{мас} < 0,5$, Мпа)	0,325	0,200	0,372	0,362
	3.4. Вельми високий ($K_{мас} > 0,5$, Мпа)	0,100	0,034	0,233	0,138
4. Вплив існуючих підземних об'єктів	4.1. Відсутній (відстань понад 50 м)	0,129	0,055	0,108	0,032
	4.2. Незначний (відстань 20 – 50 м)	0,516	0,422	0,432	0,336
	4.3 Впливовий (відстань 10 – 20 м)	0,226	0,437	0,351	0,584
	4.4 Загрозливий (відстань ближче 10 м)	0,129	0,087	0,108	0,048
5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів	5.1. Невивітрілі глини та піски середньої щільності	0,175	0,269	0,265	0,320
	5.2. Техногенні відклади	0,100	0,127	0,143	0,157
	5.3. Делювіальні глинисті ґрунти (водонасичені), обводнені надзаплавні піски	0,400	0,402	0,327	0,354
	5.4. Просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул)	0,325	0,203	0,265	0,169
6. Розрахунковий опір ґрунту	6.1. Дуже міцні ґрунтові основи > 300 кПа	0,000	0,000	0,093	0,091
	6.2. Міцні 200-300 кПа	0,121	0,113	0,233	0,328
	6.3. Ґрунти середньої міцності 150-200 кПа	0,485	0,575	0,372	0,402
	6.4. Відносно міцні ґрунти < 150 кПа	0,394	0,313	0,302	0,179
7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки	7.1. Водоносні горизонти у $P-N_{Inp}$	0,217	0,193	0,372	0,383
	7.2. Глибина залягання ґрунтових вод > 3 м, напірних > 10 м	0,283	0,365	0,372	0,474
	7.3. Глибина залягання ґрунтових вод < 3 м, напірних < 10 м	0,348	0,358	0,093	0,089
	7.4. Наявні підтоплення та/або пливуні	0,152	0,084	0,163	0,054
8. Тип рельєфу і морфометрія	8.1. Плaskі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини	0,143	0,159	0,000	0,000
	8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів	0,265	0,340	0,194	0,353
	8.3. Долини малих річок, слабко розчленовані схили, висока заплава	0,327	0,416	0,361	0,536
	8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава	0,265	0,086	0,444	0,111
9. Інженерно-геологічні процеси	9.1. Відсутні	0,082	0,043	0,093	0,027
	9.2. Процеси застабілізовані	0,265	0,320	0,302	0,303
	9.3. Прояв зсувних зміщень незначних об'ємів	0,327	0,527	0,372	0,586
	9.4. Активний прояв просідання, підтоплення, гравітаційних процесів	0,327	0,109	0,233	0,084
10. Геотехнології будівництва	10.1. Відкриті	0,200	0,364	0,200	0,119
	10.2. Підземні	0,800	0,636	0,800	0,881

В табл. 7.10 у стовпчику «Вхід» надано нормовані оцінки, отримані шляхом експертного оцінювання, у стовпчику «Розр.» надано розрахункові значення з першого етапу процедури МММА, які враховують взаємозв'язки між всіма параметрами. Як видно з таблиці, принципових змін у розподілах ймовірностей

альтернатив не відбулось, отже експертне оцінювання проведено достатньо якісно, і оцінки параметрів добре узгоджуються між собою.

На основі розрахованих значень проведено другий етап МММА для отримання оцінок результативностей рішення щодо інженерно-геологічних факторів:

Таблиця 7.11 – Результати розрахунку оцінок альтернатив МТ рішення щодо ділянки

Параметр	Альтернатива	Тунель 1	Тунель 5
А. Придатність ділянки	A.1. Придатна	0,777	0,799
	A.2. Непридатна	0,223	0,201
В. Масштаб об'єкта	B.1. Площа перерізу до 10 м ²	0,643	0,712
	B.2. Площа перерізу до 25 м ²	0,255	0,232
	B.3. Площа перерізу до 40 м ²	0,084	0,049
	B.4. Площа перерізу понад 40 м ²	0,018	0,007
С. Рівень забудови	C.1. 0–10 м	0,096	0,021
	C.2. 10–20 м	0,183	0,100
	C.3. 20–60 м	0,445	0,360
	C.4. глибше 60 м	0,276	0,518
D. Фактор ризику	D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності	0,039	0,046
	D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд	0,348	0,417
	D.3. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти	0,067	0,111
	D.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів	0,547	0,426
E. Ступінь ризику	E.1. <3%	0,089	0,050
	E.2. 3–10%	0,598	0,584
	E.3. 10–20%	0,274	0,308
	E.4. 20–50%	0,031	0,044
	E.5. >50%	0,009	0,014
F. Рівень ризику	F.1. 0,1–5% QW	0,212	0,137
	F.2. 5–20% QW	0,701	0,768
	F.3. 20–50%QW	0,079	0,085
	F.4. >50% QW	0,008	0,010

З табл. 7.11 можна зробити висновок, що обидва тунелі достатньо сприятливі для будівництва (вага альтернативи «A.1. Придатна» суттєво перевищує вагу «A.2. Непридатна»), причому в приблизно рівній мірі. Для тунелю 5, відповідно до його характеристик, розраховані значення яких наведені в табл. 2.8, модель пропонує менші розміри перерізу і більшу глибину залягання (вага альтернативи «C.4. глибше 60 м» складає 0,518 для тунелю 5 і 0,276 для тунелю 1). Також дві розглядувані ділянки мають дещо різні профілі найбільш вірогідних ризиків –

для тунелю 1 найбільш вірогідним є фактор ризику «D.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів», вага якого складає 0,547, що значно перевищує наступний за значимістю фактор «D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд», вага якого складає 0,348. Для тунелю 5 обидва цих фактори є приблизно рівнозначними (ваги складають 0,426 і 0,417 відповідно). Профілі ступеню і рівня ризику для двох тунелів достатньо близькі, з невеликим зміщенням тунелю 5 в сторону більших ступеня і рівня ризику (рис. 7.5).

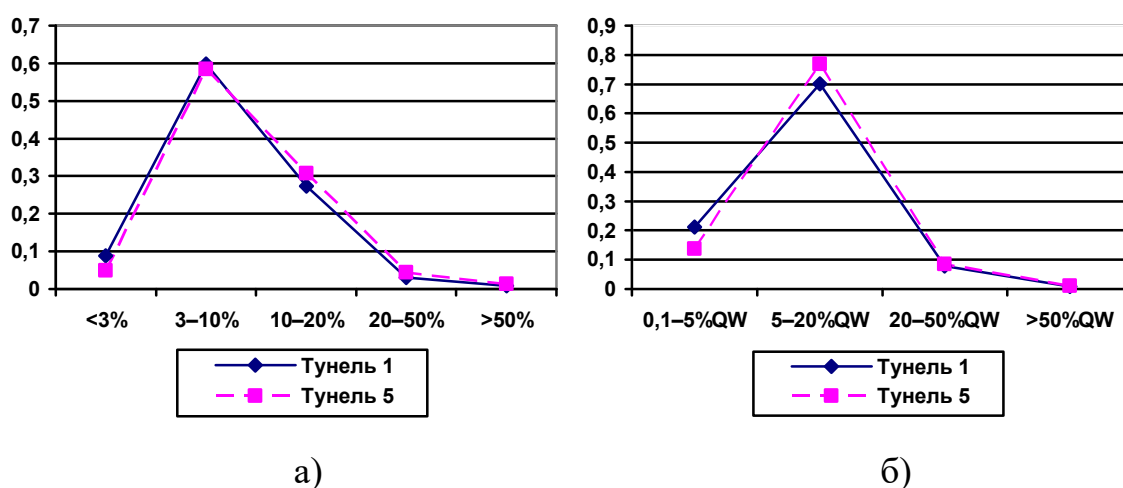


Рисунок 7.5 – Оцінки ступенів (а) і рівнів (б) ризику для тунелів 1 і 5

Далі було проведене оцінювання структурно-функціональних факторів, морфологічна таблиця для яких наведена в табл. 6.13. Для оцінювання було використано дві моделі, побудовані на основі незалежного оцінювання двома експертами. В табл. 7.12 наведено вхідні оцінки для двох розглядуваних тунелів, а також по два набори оцінок, розрахованих процедурою першого етапу двоетапного МММА з використанням різних моделей, відповідні стовпчики з розрахованими значеннями підписані «Експ1», «Експ2».

Таблиця 7.12 – Вхідні значення оцінок структурно-функціональних факторів тунелів і результати першого етапу МММА

Параметр	Альтернативи параметра	Тунель 1			Тунель 5		
		Вхід	Експ1	Експ2	Вхід	Експ1	Експ2
1. Тип забудови в районі потенційного тунелю	1.1. Житлова забудова	0,197	0,250	0,328	0,258	0,471	0,315
	1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова	0,197	0,194	0,188	0,210	0,298	0,272
	1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти	0,061	0,043	0,068	0,258	0,176	0,261
	1.4. Парки, зони відпочинку	0,242	0,219	0,320	0,210	0,053	0,152
	1.5. Промислова забудова	0,061	0,055	0,069	0,000	0,000	0,000
	1.6. Незабудовані території	0,242	0,240	0,028	0,065	0,002	0,000
2. Щільність житлової забудови	2.1. Дуже низька	0,175	0,130	0,046	0,000	0,000	0,000
	2.2. Низька	0,400	0,450	0,100	0,121	0,039	0,000
	2.3. Середня	0,325	0,332	0,704	0,485	0,488	0,575
	2.4. Висока	0,100	0,088	0,150	0,394	0,473	0,425
3. Фактор середмістя	3.1. Ділянка розташована в зоні середмістя	0,121	0,089	0,285	0,500	0,455	0,845
	3.2. Ділянка впливає на автомобільний рух у середмісті	0,394	0,401	0,164	0,500	0,545	0,155
	3.3. Ділянка поза середмістям	0,485	0,510	0,552	0,000	0,000	0,000
4. Залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю	4.1. Дуже низька	0,233	0,152	0,054	0,100	0,007	0,001
	4.2. Низька	0,372	0,367	0,143	0,100	0,029	0,008
	4.3. Середня	0,302	0,381	0,598	0,400	0,414	0,427
	4.4. Висока	0,093	0,100	0,205	0,400	0,550	0,565
5. Інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю	5.1. Низька	0,093	0,165	0,046	0,000	0,000	0,000
	5.2. Середня	0,302	0,287	0,576	0,289	0,151	0,251
	5.3. Висока	0,372	0,390	0,345	0,356	0,418	0,595
	5.4. Дуже висока	0,233	0,157	0,034	0,356	0,431	0,154
6. Середня швидкість автомобільного руху у години «пік»	6.1. до 15 км/год	0,148	0,156	0,033	0,194	0,297	0,159
	6.2. 15-30 км/год	0,259	0,385	0,229	0,444	0,615	0,658
	6.3. 30-60 км/год	0,593	0,459	0,738	0,361	0,088	0,183
7. Наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами	7.1. Дуже погана	0,129	0,110	0,036	0,325	0,216	0,243
	7.2. Погана	0,516	0,462	0,358	0,400	0,318	0,545
	7.3. Середня	0,226	0,246	0,326	0,175	0,252	0,134
	7.4. Добра	0,129	0,182	0,281	0,100	0,214	0,078
8. Пропускна здатність наземних шляхів	8.1. Погана	0,233	0,211	0,119	0,361	0,367	0,536
	8.2. Середня	0,533	0,540	0,648	0,444	0,513	0,432
	8.3. Висока	0,233	0,250	0,233	0,194	0,120	0,033

За результатами цього оцінювання можна зробити певні порівняння двох ділянок:

– для ділянки тунелю 5 більшу частину території займає житлова, комерційна, адміністративна забудова, тоді як для тунелю 1 велику частку мають парки і незабудовані території. Відповідно, для ділянки тунелю 5 також суттєво вище щільність житлової забудови (параметр 2): основна вага припадає на альтернативи «Висока» і «Дуже висока»; для тунелю 1 більша частина ваги для цього параметра припадає на альтернативи «Середня», «Висока»;

– тунель 5 однозначно можна віднести до зони середмістя і такого, що впливає на автомобільні шляхи у середмісті; ділянка тунелю 1 скоріше знаходиться поза середмістям;

– залюдненість в районі ділянки тунелю 5 скоріше від середньої до високої; в районі тунелю 1 – скоріше від низької до середньої;

– інтенсивність автомобільного руху більше на ділянці тунелю 5, в години «пік» швидкість руху при цьому менша порівняно з ділянкою тунелю 1;

– наземна зв'язаність і пропускна здатність автомобільних шляхів краща для ділянки тунелю 1.

На основі оцінок, наведених в табл. 7.12, і побудованої матриці зв'язків був проведений другий етап процедури МММА для оцінювання наслідків впливу структурно-функціональних факторів, оцінювані параметри якого надані в табл. 6.15. Для цього розрахунку також були задіяні дві альтернативні моделі, результати розрахунку наведені в табл. 7.13.

Для зручності далі використовуються усереднені оцінки результатів двох моделей. За результатами оцінювання можна зробити ряд висновків щодо порівняння ділянок потенційного будівництва тунелів:

1) будівництво обох тунелів є доцільним: вага альтернативи «А.1. Доцільний» суттєво перевищує вагу альтернативи «А.2. Недоцільний», причому для тунелю 5 така перевага є абсолютною (відповідно, 0,895 і 0,105 для тунелю 1 і 0,994 і 0,006 для тунелю 5). Це є цілком логічним результатом, оскільки для оцінювання взяті реальні заплановані ділянки, вибір яких є обґрунтованим.

2) важливість факторів ризику дещо відрізняється для розглянутих ділянок, результати розрахунку для параметра «В. Вагомість факторів ризику на ділянці» наведені у вигляді діаграм на рис. 7.6.

Основною відмінністю між ділянками з точки зору важливості факторів ризику є те, що для ділянки 5 значно важливішим є фактор дорожніх заторів, тоді як для ділянки 1 більшу важливість слід приділити фактору дорожніх аварій.

Таблиця 7.13 – Оцінювання наслідків впливу структурно-функціональних параметрів ділянок потенційного будівництва тунелів на екологічно-безпекові фактори

Параметр	Альтернатива	Тунель 1		Тунель 5	
		Експ1	Експ2	Експ1	Експ2
А. Доцільність тунелю	А.1. Доцільний	0,897	0,893	0,988	0,999
	А.2. Недоцільний	0,103	0,107	0,012	0,001
В. Вагомість факторів ризику на ділянці	В.1. Забруднення повітря	0,151	0,134	0,182	0,164
	В.2. Шум і динамічні впливи	0,127	0,205	0,137	0,165
	В.3. Дорожні затори	0,445	0,115	0,527	0,380
	В.4. Дорожні аварії	0,277	0,546	0,154	0,291
С. Вплив побудови тунелю на фактор «Забруднення повітря»	С.1. Не впливає	0,134	0,042	0,033	0,010
	С.2. Частково мінімізує	0,341	0,466	0,291	0,287
	С.3. Помірно мінімізує	0,322	0,300	0,389	0,327
	С.4. Суттєво мінімізує	0,204	0,193	0,287	0,376
D. Вплив побудови тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»	D.1. Не впливає	0,092	0,080	0,091	0,020
	D.2. Частково мінімізує	0,317	0,306	0,295	0,244
	D.3. Помірно мінімізує	0,374	0,349	0,380	0,361
	D.4. Суттєво мінімізує	0,217	0,265	0,233	0,375
E. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні затори»	E.1. Не впливає	0,030	0,185	0,006	0,013
	E.2. Частково мінімізує	0,398	0,486	0,280	0,193
	E.3. Помірно мінімізує	0,395	0,174	0,464	0,339
	E.4. Суттєво мінімізує	0,177	0,154	0,249	0,455
F. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні аварії»	F.1. Не впливає	0,090	0,079	0,038	0,007
	F.2. Частково мінімізує	0,315	0,367	0,315	0,438
	F.3. Помірно мінімізує	0,357	0,339	0,388	0,330
	F.4. Суттєво мінімізує	0,238	0,214	0,259	0,225

3) обидва потенційні тунелі забезпечують в певній мірі мінімізацію розглядуваних факторів ризику, однак міра цього впливу залежить від конкретного тунелю і типу фактора ризику.

Для всіх розглядуваних факторів ризику» оцінки впливу обох тунелів представлені на рис. 7.7–7.10.

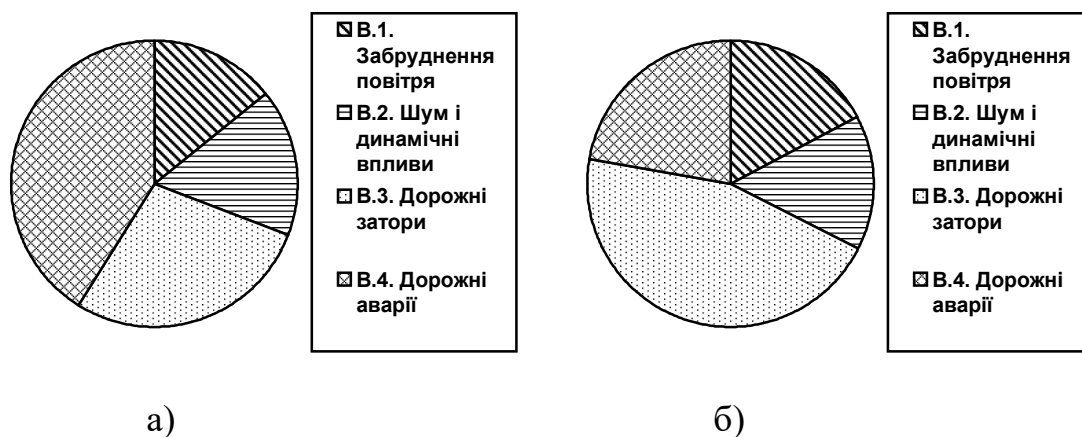


Рисунок 7.6 – Діаграми оцінок вагомості факторів ризику для ділянки тунелю 1 (а) і тунелю 5 (б)

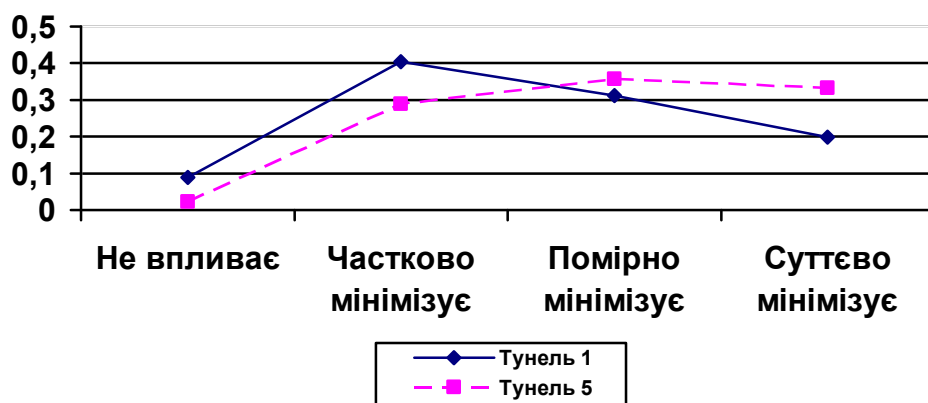


Рисунок 7.7 – Діаграма впливу тунелів на фактор ризику «Р.1. Забруднення повітря»

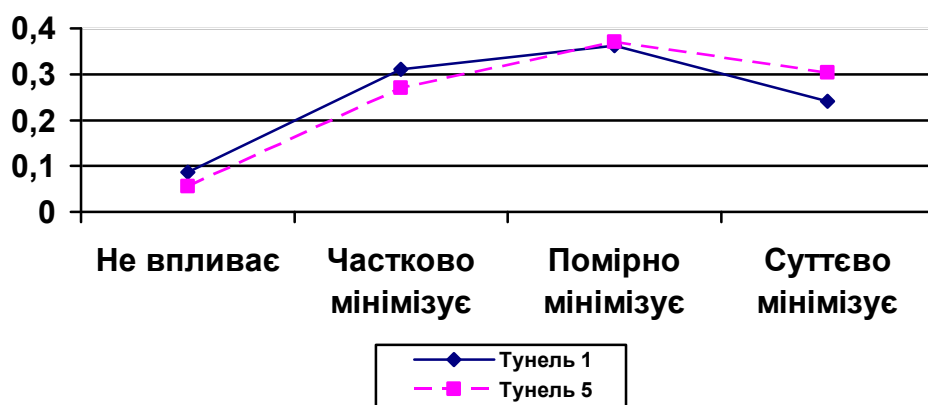


Рисунок 7.8 – Діаграма впливу тунелів на фактор ризику «Р.2. Шум і динамічні впливи»

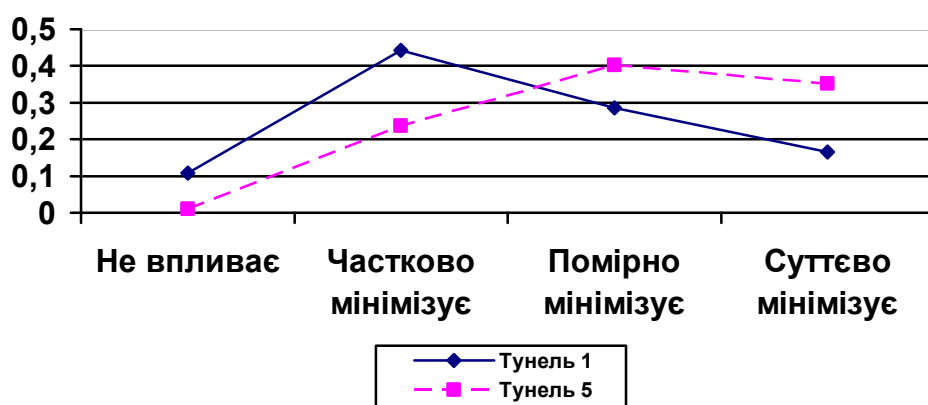


Рисунок 7.9 – Діаграма впливу тунелів на фактор ризику «Р.3. Дорожні затори»

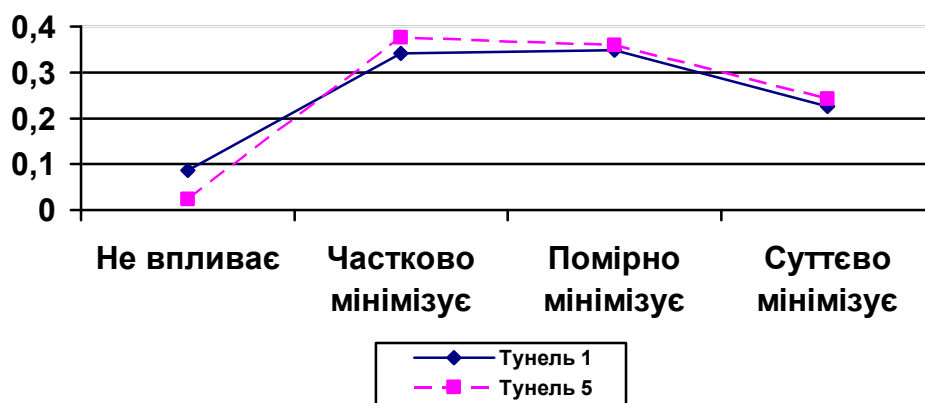


Рисунок 7.10 – Діаграма впливу тунелів на фактор ризику «Р.4. Дорожні аварії»

За рис. 7.7–7.10 і оцінками табл. 7.13 можна зробити висновки і порівняння:

– вага альтернатив «Не впливає» є дуже малою, особливо для тунелю 5. Цей факт також закономірно впливає з високої ваги альтернативи «А.1. Доцільний», яка вже була відмічена раніше;

– в середньому тунель 5 сильніше впливає на мінімізацію факторів ризику. Для факторів «Р.2. Шум і динамічні впливи» і «Р.4. Дорожні аварії» перевага тунелю 5 дуже незначна, в рамках похибки оцінювання, однак для факторів «Р.1. Забруднення повітря» і «Р.3. Дорожні затори» перевага тунелю 5 стає більш очевидною. Якщо за рис. 7.7, 7.9 для тунелю 1 ступінь мінімізації можна охарактеризувати як «частковий-помірний», то для тунелю 5 більше підходить характеристика «помірний-суттєвий»;

– для порівняння впливу будівництва потенційних тунелів на різні фактори ризику введемо наступний коефіцієнт: $w_{ratio} = (w_{medium} + w_{high}) / (w_{low} + w_{none})$, який відображає відношення суми ваг альтернатив помірного w_{medium} і суттєвого w_{high} впливу будівництва тунелю на мінімізацію відповідного фактору ризику, до суми ваг альтернатив часткового w_{low} і відсутнього w_{none} впливу будівництва тунелю на мінімізацію того ж фактора ризику. Більші значення цього коефіцієнта свідчать про більш значний вплив потенційного будівництва тунелю на відповідний фактор ризику. Розраховані коефіцієнти w_{ratio} для обох ділянок і кожного з факторів ризику наведені у вигляді діаграми на рис. 7.11:

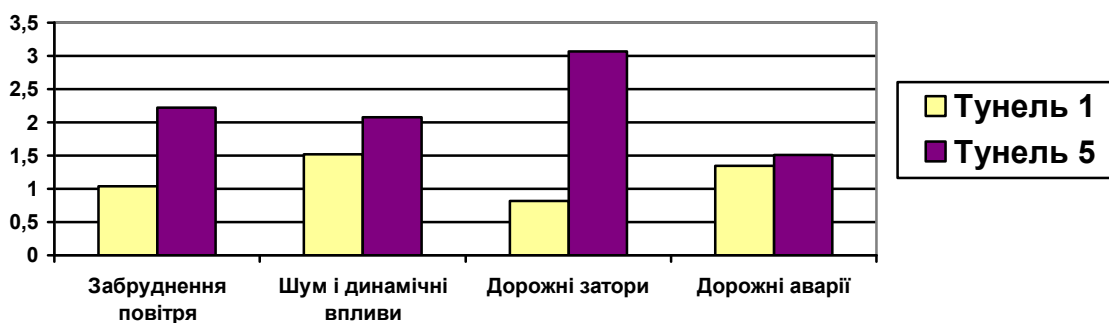


Рисунок 7.11 – Коефіцієнт w_{ratio} ділянок тунелів 1 і 5 для різних факторів ризику

З рис. 7.11 стає очевидним, що тунель 1 найбільш ефективний для мінімізації факторів шуму і дорожніх аварій, а тунель 5 дуже ефективний з точки зору мінімізації фактора дорожніх заторів. Водночас з рисунку стає більш наглядною перевага тунелю 5, яка вже відмічалася раніше.

Слід також зазначити, що високий показник здатності тунелю 5 мінімізувати вплив фактора «РЗ. Дорожні затори» є особливо важливим, оскільки цей фактор для відповідної ділянки виявився і найбільш вагомим, як показав проведений вище аналіз ваг альтернатив параметра «В. Вагомість факторів ризику на ділянці».

Розроблена модель оцінювання ділянок потенційного будівництва тунелів дає достатньо адекватні, правдоподібні результати, які є корисними на передпроектній стадії будівництва для надання підтримки прийняття рішень щодо будівництва. Результати можуть бути представлені в дуже наглядному, зручному для розуміння особами, що приймають рішення, вигляді, що підвищує користь від розробленого інструментарію. Створена модель є універсальною, з її допомогою можуть бути оцінені інші заплановані і потенційні ділянки будівництва тунелів у м. Києві або будь-яких інших великих містах.

7.3.3 Оцінювання ділянок запланованих тунелів м. Києва з урахуванням структурно-функціональних, екологічно-безпекових факторів

Для тестування розширеної моделі, описаної в п. 6.3.2.2, було здійснено оцінювання і порівняння всіх восьми автомобільних тунелів, передбачених

Генеральним планом м. Києва (рис. 7.4). Зазначені на рис. 7.4 тунелі можна поділити на 3 групи: 1) сполучення лівого та правого берегів Києва підземними автомагістралями, тунелі під Дніпром (3, 4, 5); забезпечення найкоротшого та найзручнішого маршруту руху з урахуванням рельєфу місцевості, тунелі під пагорбами (1, 2, 5, 6, 8); розподіл транспорту на перевантажених трасах (дублювання автомагістралей), тунелі під протяжними автомагістралями (5, 7). Повеєнне відновлення столиці України вже зараз потребує аналізу та перегляду довоєнних планів розвитку міста, зокрема великих інфраструктурних проектів тунельного будівництва, що зумовлено зокрема необхідністю найбільш ефективного розвитку інвестиційної політики для швидкого наближення м. Києва до стандартів ЄС щодо безпеки, кліматичної (екологічної) нейтральності, транспортного комфорту, захисту від можливої майбутньої військової агресії тощо.

Вхідні оцінки і результати першого етапу МММА наведені в додатку Б. Результати розрахунків другого етапу двоетапної процедури МММА показані в табл. 7.14.

Табл. 7.14 показує, що найбільші пріоритети (параметр «А. Доцільність будівництва тунелю») мають тунелі 3, 4, 5, які поєднують лівий і правий береги Дніпра. Це зумовлене кількома причинами. По-перше, слід зазначити, що існуючі автомобільні мости перевантажені, у «час пік» (маятниковий рух) швидкість руху ними суттєво обмежена і місто нагально потребує додаткових переходів Дніпра. По-друге, переходи через Дніпро є найбільш критичною транспортною інфраструктурою Києва. Переривання функціонування мостів, які можуть бути вражені у воєнний час ударами з повітря, здатне призвести до транспортного колапсу міста, розриваючи його на дві окремі частини. Тому тунелі, які є значно більш надійними та захищеними від ударів з повітря спорудами ніж мости, можуть забезпечити в цих умовах транспортний рух між берегами Дніпра, зокрема й військової техніки. Тому вплив ризику «В.6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів» помітно вплинув на рейтинг даних тунелів.

Таблиця 7.14 – Оцінки структурно-функціональних, екологічно-безпекових факторів будівництва тунелів, передбаченим Генеральним планом м. Києва

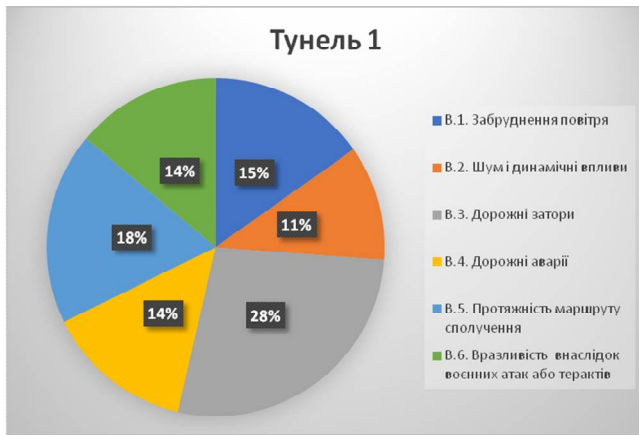
Параметр	Альтернатива	Тунель							
		1	2	3	4	5	6	7	8
А. Доцільність будівництва	А.1. Доцільний	0,750	0,977	0,993	0,997	0,998	0,976	0,886	0,973
	А.2. Недоцільний	0,250	0,023	0,007	0,003	0,002	0,024	0,114	0,027
В. Вагомість факторів ризику на ділянці	В.1. Забруднення повітря	0,152	0,062	0,031	0,020	0,051	0,044	0,150	0,081
	В.2. Шум і динамічні впливи	0,110	0,032	0,018	0,008	0,029	0,020	0,093	0,054
	В.3. Дорожні затори	0,274	0,379	0,276	0,315	0,331	0,439	0,352	0,331
	В.4. Дорожні аварії	0,141	0,036	0,049	0,049	0,029	0,037	0,081	0,050
	В.5. Протяжність маршруту сполучення	0,184	0,331	0,294	0,317	0,324	0,300	0,190	0,303
	В.6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	0,139	0,160	0,332	0,291	0,236	0,161	0,133	0,182
С. Вплив на фактор «Забруднення повітря»	С.1. Не впливає	0,013	0,003	0,019	0,021	0,000	0,007	0,001	0,002
	С.2. Частково мінімізує	0,266	0,230	0,274	0,298	0,104	0,296	0,139	0,191
	С.3. Помірно мінімізує	0,463	0,577	0,599	0,631	0,543	0,570	0,457	0,525
	С.4. Суттєво мінімізує	0,259	0,189	0,108	0,050	0,353	0,127	0,404	0,282
D. Вплив на фактор «Шум і динамічні впливи»	D.1. Не впливає	0,043	0,027	0,097	0,100	0,011	0,044	0,014	0,018
	D.2. Частково мінімізує	0,318	0,476	0,502	0,625	0,325	0,546	0,265	0,333
	D.3. Помірно мінімізує	0,354	0,310	0,270	0,215	0,377	0,273	0,368	0,368
	D.4. Суттєво мінімізує	0,286	0,187	0,130	0,061	0,287	0,136	0,353	0,281
E. Вплив на фактор «Дорожні затори»	E.1. Не впливає	0,076	0,002	0,005	0,001	0,000	0,003	0,013	0,002
	E.2. Частково мінімізує	0,390	0,081	0,138	0,086	0,060	0,097	0,283	0,131
	E.3. Помірно мінімізує	0,308	0,326	0,357	0,362	0,276	0,382	0,334	0,337
	E.4. Суттєво мінімізує	0,225	0,591	0,499	0,552	0,663	0,519	0,370	0,530
F. Вплив на фактор «Дорожні аварії»	F.1. Не впливає	0,232	0,074	0,337	0,616	0,015	0,316	0,030	0,048
	F.2. Частково мінімізує	0,367	0,472	0,372	0,238	0,438	0,375	0,395	0,457
	F.3. Помірно мінімізує	0,239	0,299	0,200	0,105	0,329	0,208	0,308	0,308
	F.4. Суттєво мінімізує	0,162	0,155	0,092	0,041	0,218	0,102	0,267	0,187
G. Вплив на протяжність маршруту сполучення	G.1. Не впливає	0,128	0,020	0,002	0,001	0,010	0,014	0,125	0,021
	G.2. Частково мінімізує	0,266	0,101	0,075	0,059	0,077	0,096	0,252	0,098
	G.3. Помірно мінімізує	0,343	0,345	0,357	0,345	0,358	0,335	0,355	0,367
	G.4. Суттєво мінімізує	0,263	0,534	0,567	0,595	0,555	0,556	0,268	0,515
H. Вплив на фактор «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»	H.1. Не впливає	0,052	0,007	0,000	0,000	0,000	0,007	0,020	0,006
	H.2. Частково мінімізує	0,278	0,102	0,025	0,021	0,019	0,093	0,215	0,112
	H.3. Помірно мінімізує	0,234	0,219	0,209	0,204	0,193	0,225	0,234	0,214
	H.4. Суттєво мінімізує	0,436	0,673	0,766	0,775	0,788	0,675	0,530	0,668

Найбільший пріоритет має тунель 5, на рейтинг якого крім зазначених вище ризиків вплинули також пов'язані між собою «В.5. Протяжність маршруту сполучення» та «В.3. Дорожні затори», оскільки тунель проходить середмістям. Четвертий рейтинг отримав тунель 2, який суттєво скорочує шлях автомобільного транспорту в напрямку Подільського мостового переходу, проходячи через узвишся та урочище Юрковиця в Подільському та Шевченківському районах Києва. Нижня частина рейтингу (тунелі 1, 6, 7, 8) зберігають певні перспективи, особливо тунель 8, наблизений за оцінкою до тунелів першої групи (траса якого

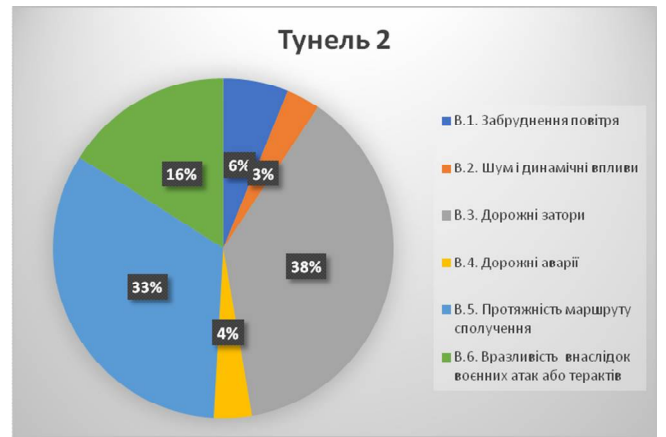
пройде також середмістям), проте ці тунелі не можуть бути рекомендовані як найбільш пріоритетні.

Оцінки найбільш критичних факторів ризику для ділянок у формі кругових діаграм наведені на рис. 7.12.

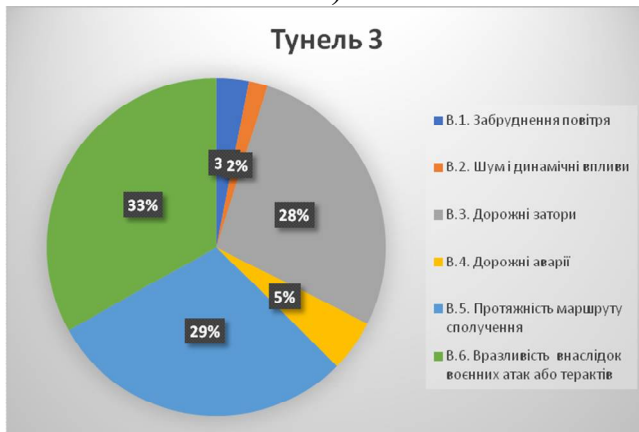
На рис. 7.12 можна побачити, що тунелі, що сполучають береги Дніпра, мають вагому частку для фактора «В.6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів», тоді як для інших тунелів цей фактор є менш критичним, і на перший план виходять фактори «В.5. Протяжність маршруту сполучення» та «В.3. Дорожні затори». В цілому, візуалізація у формі рис. 7.12 дозволяє зрозуміти «профіль» ділянки, тобто її першочергові потреби.



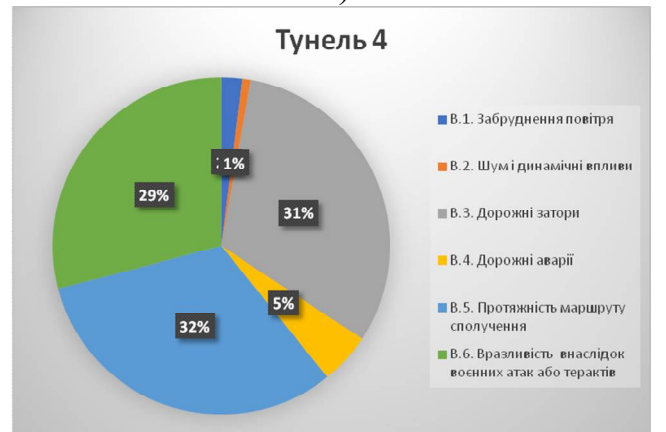
а)



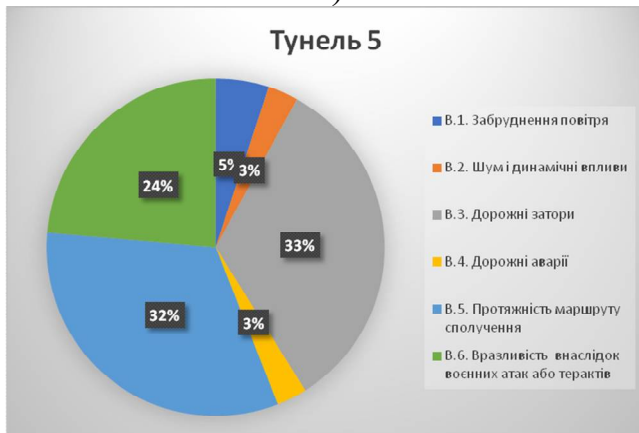
б)



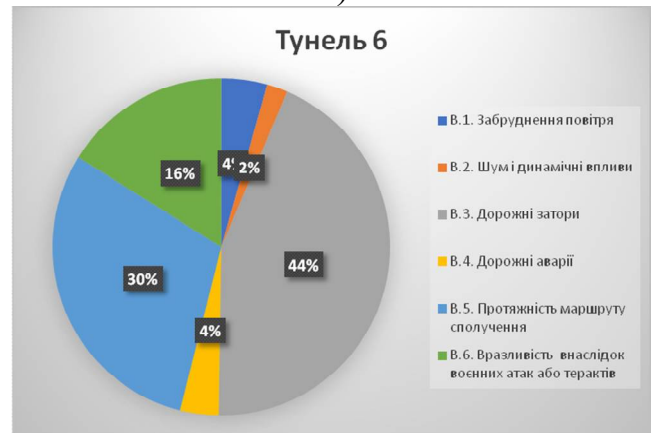
в)



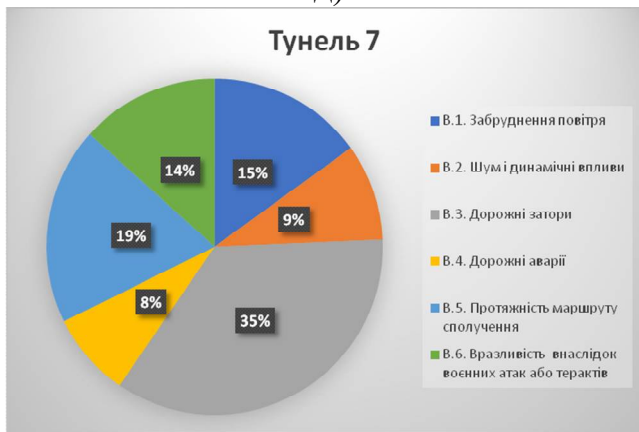
г)



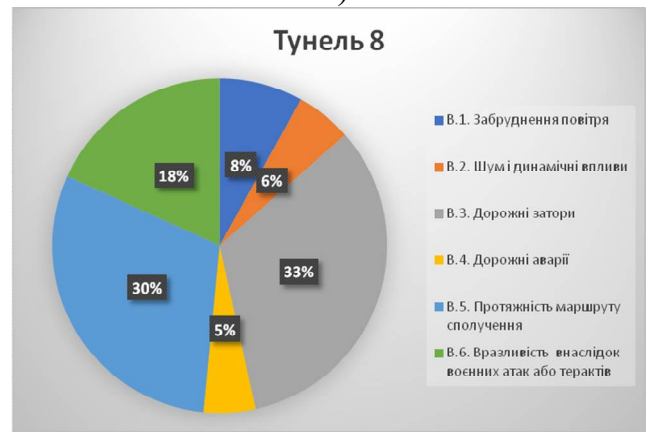
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 7.12 – Оцінки найбільш критичних факторів ризику для ділянок

Порівняння тунелів за впливом на конкретні фактори (на основі параметрів С–Н з табл. 7.14) можна зробити на основі діаграм на рис. 7.13–7.18.

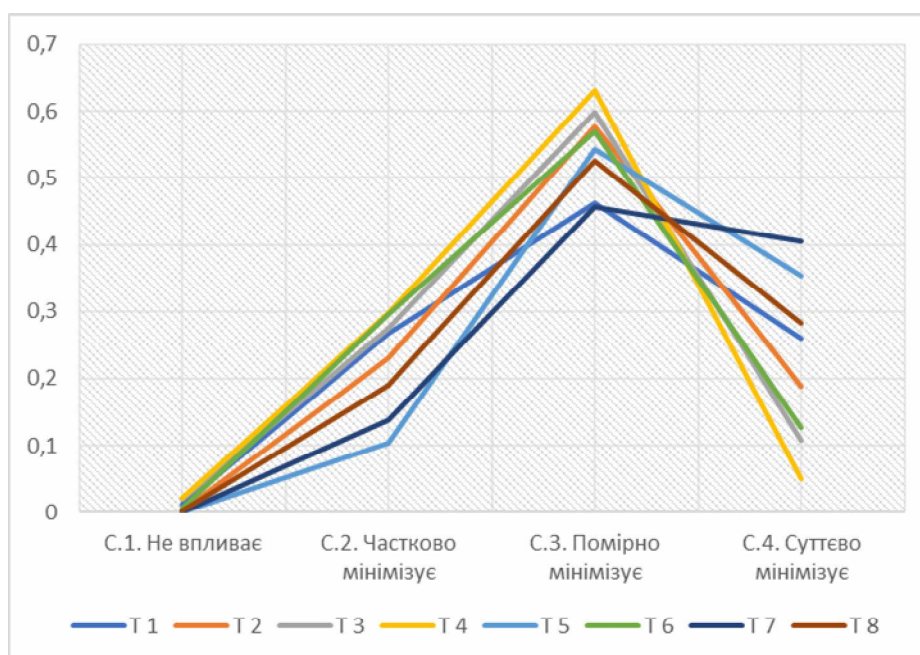


Рисунок 7.13 – Вплив будівництва тунелів на фактор «Забруднення повітря»

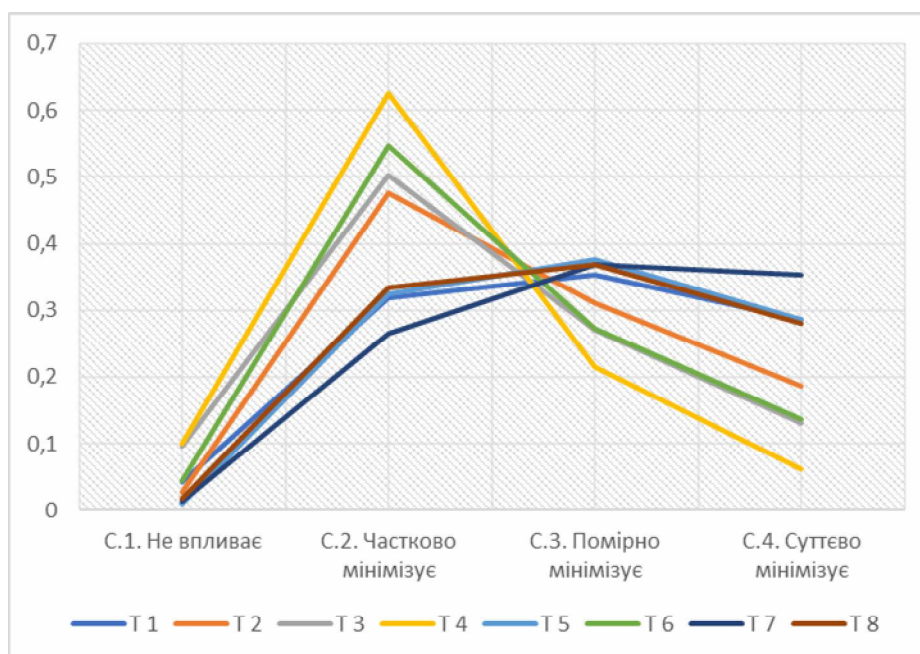


Рисунок 7.14 – Вплив будівництва тунелів на фактор «Шум і динамічні впливи»

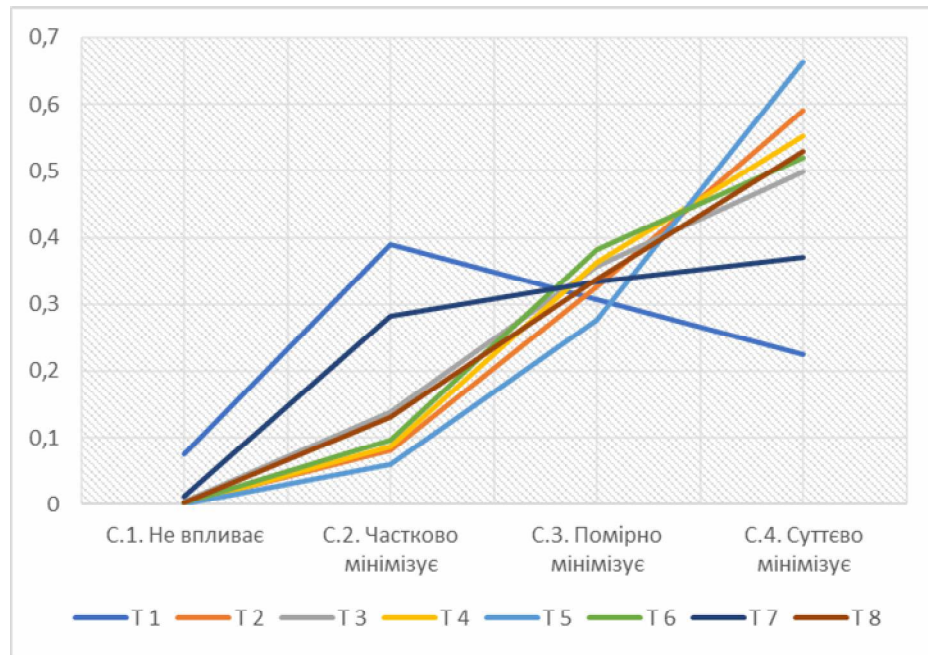


Рисунок 7.15 – Вплив будівництва тунелів на фактор «Дорожні затори»

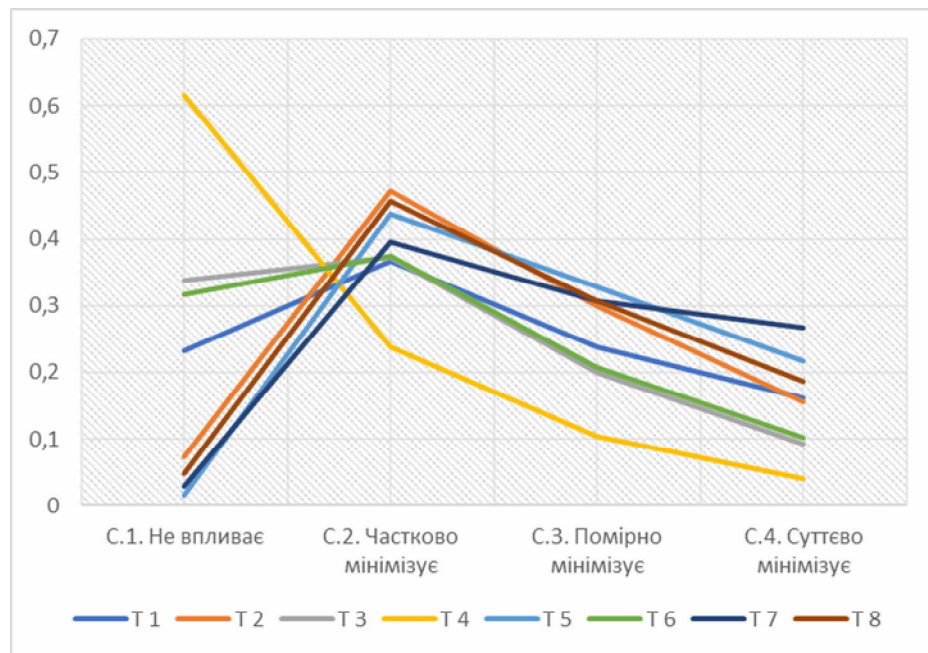


Рисунок 7.16 – Вплив будівництва тунелів на фактор «Дорожні аварії»

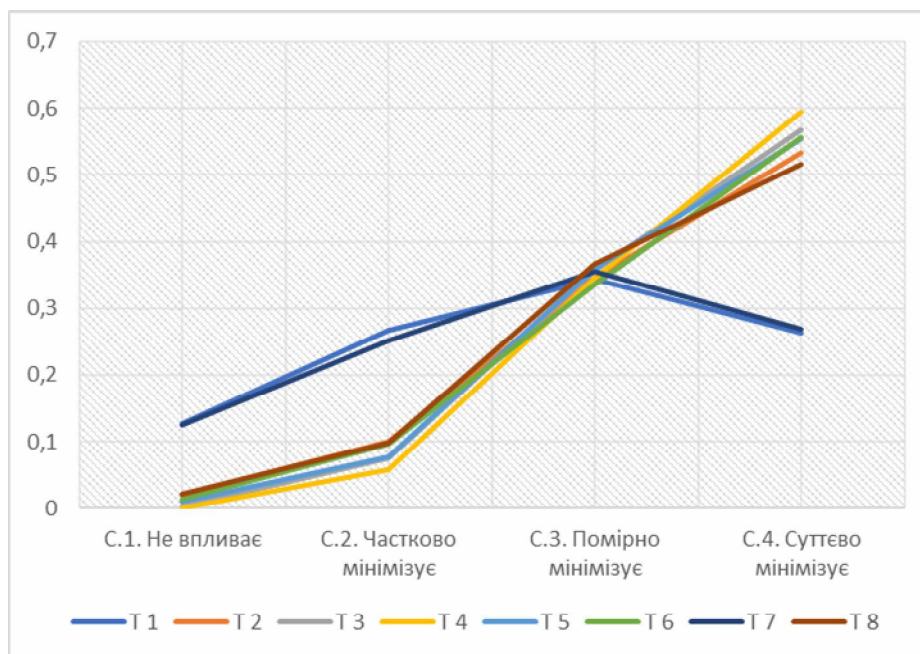


Рисунок 7.17 – Вплив будівництва тунелів на фактор «Протяжність маршруту сполучення»

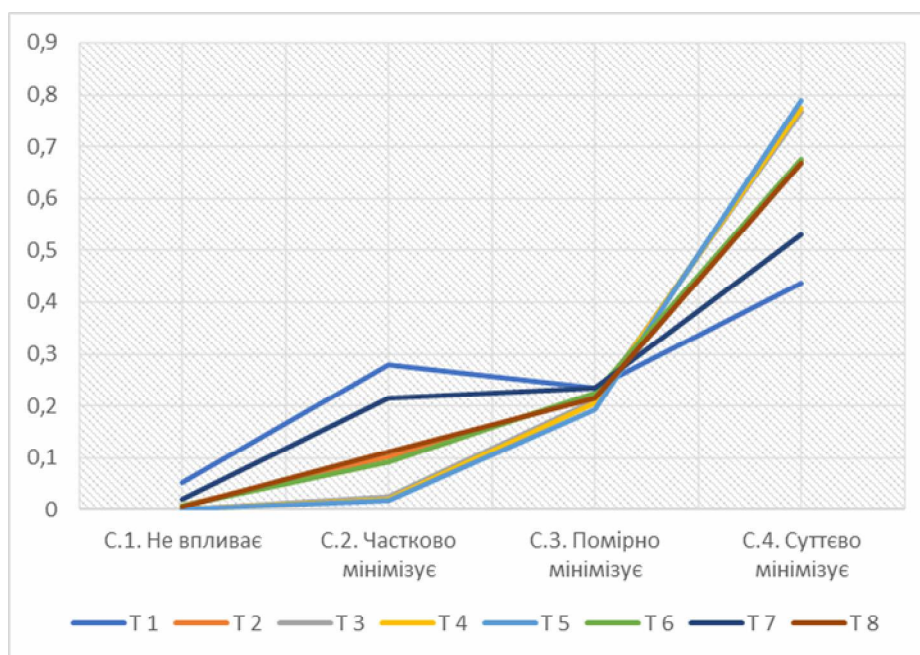


Рисунок 7.18 – Вплив будівництва тунелів на фактор «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»

Висота графіків у правій частині рис. 7.13–7.18 свідчить про сильніший вплив тунелів на відповідний фактор. Для фактору «Забруднення повітря» це тунелі 5 і 7; для фактору «Шум і динамічні впливи» – це тунелі 1, 5, 7, 8, ділянки яких проходять через найбільш забудовані території; для фактору «Дорожні затори» майже всі тунелі показують близькі результати, окрім тунелів 1 і 7, вплив яких дещо менший; для фактору «Дорожні аварії» це тунелі 5 і 7, будівництво

яких дозволяє уникнути аварійно небезпечних ситуацій на перехрестях; для фактору «Протяжність маршруту сполучення» також майже всі тунелі, крім 1 і 7, показали досить близькі і сильні результати; для фактору «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів» очікувано найбільш впливовими виявились тунелі 3, 4, 5, пов'язані із переходами через р. Дніпро. Як бачимо з цього аналізу, тунель 5 є одним із найбільш впливових майже за всіма факторами, що розглядались.

7.3.4 Використання комбінованої моделі на основі модифікованого методу морфологічного аналізу і методу аналізу ієрархій

Модель на основі МММА не передбачає порівняння критеріїв за важливістю. В певній мірі важливість критеріїв враховується в МЗАП при оцінюванні впливу на параметр «А. Доцільність будівництва тунелю», однак ці ваги є неявними, і в окремих задачах може бути зручною можливість регулювати ці ваги для відображення тих чи інших уподобань ОПР. Для цього була розроблена гібридна модель на основі МММА і МАІ, описана в пп. 6.3.2.2. Згідно з розробленою процедурою, на основі параметрів С–Н з таблиці 7.14 були розраховані парні переваги ділянок відносно кожного з факторів ризику, і з використанням методу власних векторів ЕМ [154] були розраховані локальні ваги ділянок будівництва тунелів за кожним із критеріїв, зведені в табл. 7.15.

Таблиця 7.15 – Локальні ваги тунелів відносно факторів ризику (найбільше значення серед всіх ділянок для кожного фактору виділено напівжирним)

№ тунелю	Забруднення повітря	Шум і динамічні впливи	Дорожні затори	Дорожні аварії	Протяжність маршруту сполучення	Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів
1	0,119752	0,142614	0,073593	0,118965	0,080317	0,084207
2	0,121742	0,116512	0,142816	0,137003	0,133499	0,125402
3	0,108121	0,097731	0,126838	0,095813	0,144171	0,145211
4	0,10167	0,081887	0,139329	0,068121	0,149165	0,146573
5	0,153839	0,149184	0,152463	0,162258	0,14096	0,147948
6	0,108776	0,101953	0,134738	0,099405	0,137292	0,126717
7	0,152075	0,164418	0,099496	0,170481	0,082192	0,100114
8	0,134026	0,145702	0,130728	0,147954	0,132404	0,123827

Як бачимо з табл. 7.15, тунель 5 має найвищі значення впливу на фактори ризику «Забруднення повітря», «Дорожні затори», «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»; тунель 7 має найвищі значення впливу на фактори ризику «Шум і динамічні впливи», «Дорожні аварії»; тоді як тунель 4 має найвищий показник впливу на фактор «Протяжність маршруту сполучення».

Далі були використані обидва підходи до оцінювання ваг критеріїв, наведені в п. 6.3.2.2, причому для другого підходу (експертне оцінювання) були використані оцінки трьох експертів, що ставили різні цілі при визначенні пріоритетності ділянок: 1) з точки зору безпеки; 2) з точки зору екології та кліматичної нейтральності; 3) з точки зору ефективності транспортної системи. При цьому враховується весь спектр ризиків, але пріоритетна роль (збільшена вага) відводиться в цьому випадку саме цільовому фактору. Відповідні матриці парних порівнянь факторів, і їх результуючі ваги наведені в табл. 7.16–7.18. Ваги були отримані методом власних векторів ЕМ, неузгодженість матриць парних порівнянь не перевищувала порогові значення [77].

Таблиця 7.16 – Ваги факторів ризику при пріоритезації безпеки громадян

№ фактору	1	2	3	4	5	6	Вага
1. Забруднення повітря	1	2	1/2	1	1/2	1/8	0,062
2. Шум і динамічні впливи	1/2	1	1/4	1/2	1/4	1/9	0,035
3. Дорожні затори	2	4	1	5	5	1/6	0,194
4. Дорожні аварії	1	2	1/5	1	1	1/8	0,059
5. Протяжність маршруту сполучення	2	4	1/5	1	1	1/8	0,08
6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	8	9	6	8	8	1	0,569

Таблиця 7.17 – Ваги факторів ризику при пріоритезації екології та кліматичної нейтральності

№ фактору	1	2	3	4	5	6	Вага
1. Забруднення повітря	1	2	4	3	6	7	0,417
2. Шум і динамічні впливи	1/2	1	2	1	3	4	0,202
3. Дорожні затори	1/4	1/2	1	1	1	2	0,106
4. Дорожні аварії	1/3	1	1	1	2	2	0,141
5. Протяжність маршруту сполучення	1/6	1/3	1	1/2	1	1	0,074
6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	1/7	1/4	1/2	1/2	1	1	0,06

Таблиця 7.18 – Ваги факторів ризику при пріоритезації вирішення транспортних проблем

№ фактору	1	2	3	4	5	6	Вага
1. Забруднення повітря	1	2	1/7	1/2	1/8	2	0,061
2. Шум і динамічні впливи	1/2	1	1/9	1/4	1/8	1	0,037
3. Дорожні затори	7	9	1	4	1	8	0,378
4. Дорожні аварії	2	4	1/4	1	1/3	4	0,125
5. Протяжність маршруту сполучення	8	8	1	3	1	8	0,362
6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	1/2	1	1/8	1/4	1/8	1	0,038

Із залученням отриманих ваг факторів ризику застосовувалась процедура дистрибутивного синтезу МАІ [154]. Отримані за допомогою обох підходів оцінки ділянок, а також відповідні ранжування, наведені в табл. 7.19 (у другому підході розглянуто три альтернативні варіанти). Також для порівняння наведене ранжування, отримане за допомогою МММА. Співставлення ранжувань тунелів у випадках пріоритетної ролі безпекового та кліматичного (екологічного) ризиків при реалізації ієрархічного підходу (підхід 2) наведене на рис. 7.19.

Таблиця 7.19 – Порівняння ранжувань ділянок, отриманих різними підходами

№ тунелю	Підхід 1		Підхід 2 (безпека)		Підхід 2 (екологія)		Підхід 2 (транспорт)		МММА
	Вага	Ранг	Вага	Ранг	Вага	Ранг	Вага	Ранг	
1	0,094089	8	0,088051	8	0,114315	5	0,087545	8	8
2	0,130132	4	0,129449	4	0,126161	4	0,135939	2	4
3	0,130925	3	0,134542	3	0,111164	7	0,12784	6	3
4	0,135222	2	0,135552	2	0,103144	8	0,129981	4	2
5	0,143032	1	0,14937	1	0,152633	1	0,149467	1	1
6	0,126896	6	0,125402	6	0,112015	6	0,128279	5	6
7	0,112028	7	0,108084	7	0,143301	2	0,107837	7	7
8	0,127675	5	0,12855	5	0,137267	3	0,134112	3	5

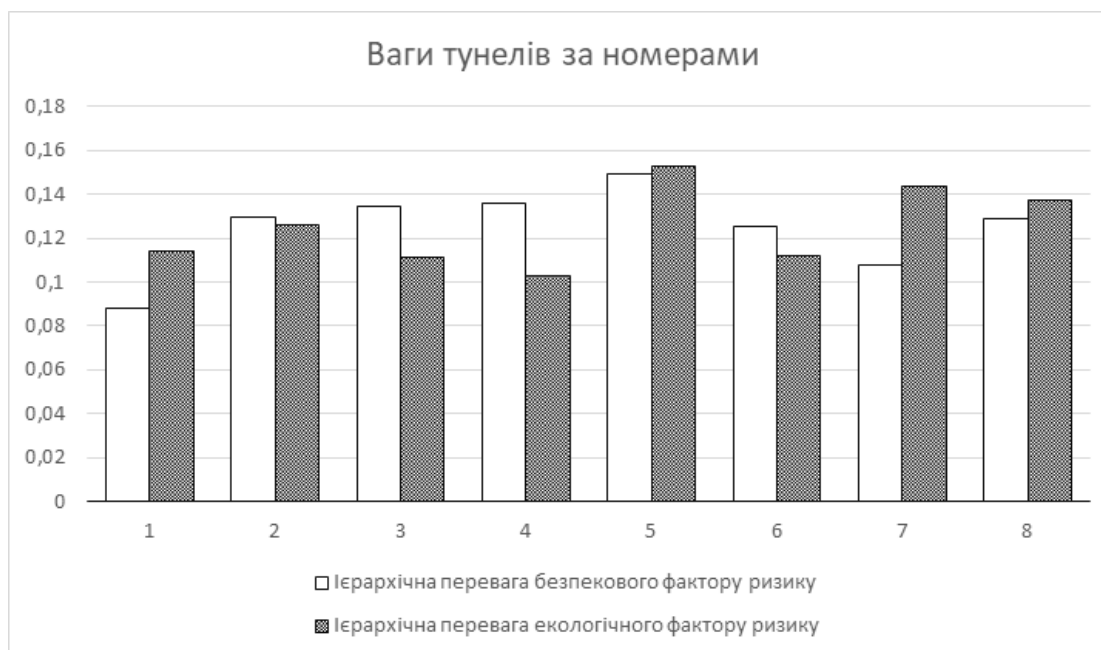


Рисунок 7.19 – Ваги тунелів при ієрархічній перевазі безпекового та кліматичного (екологічного) ризиків (підхід 2)

Аналіз таблиць і діаграм свідчить, що у базовому випадку, коли всі розглянуті ризики мають рівну пріоритетність і вагу, перші місця рейтингу отримали тунелі 5, 4 і 3. Це пояснюється значним впливом цих тунелів на вирішення транспортної проблеми Києва, ефективним сполученням лівого та правого берегів Києва підземними автомагістралями та розвантаженням мостів, скороченням маршрутів, збільшенням безпеки та надійності тунельних переходів Дніпра над мостовими переходами у разі потенційних ударів з повітря тощо. У разі реалізації другого підходу й збільшення ієрархічної ваги тих чи інших пріоритетних ризиків (в залежності від їх суспільної важливості та цілей, що можуть бути закладені у планувальні рішення) маємо дещо інші результати моделювання. Примітно, що у разі пріоритетної ролі безпекового (захисного) фактору лідерами рейтингу залишились тунелі 5, 4 і 3, що пов'язане з більшою вразливістю мостів у порівнянні з тунелями при воєнних і терористичних загрозах, а також стратегічною важливістю забезпечення в цих умовах безперешкодного зв'язку лівого і правого берегів Києва (такі споруди є важливими складовими критичної інфраструктури міста). У разі визначення пріоритетної ролі кліматичного (екологічного) фактору найбільший рейтинг отримують тунелі 5, 7 і 8. Це пояснюється тим, що значна частина тунелю 5

дублює основну автомагістраль від площі Перемоги до річки Дніпро і значною мірою розвантажує середмістя від шкідливих автомобільних викидів, корок і транспортних простоїв, шумів, динамічних впливів тощо. Те саме стосується й тунелю 8, який додатково суттєво скорочує автомобільні шляхи між порталами тунелю. Тунель 7 є найбільш протяжним з усіх запланованих тунелів, він дублює й розвантажує протяжну автомагістраль, що огортає центральне ядро міста, й здатен значною мірою оптимізувати швидкість руху на магістралі й зменшити транспортне забруднення повітря. Вага фактору кліматичної нейтральності матиме пріоритетне значення в повоєнному відновленні міст України, враховуючи міжнародні зобов'язання країни та прийнятий Верховною Радою Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики» (від 08.10.2024). Слід звернути увагу, що в обох розглянутих підходах і в усіх ієрархічних групах тунель 5 отримав найвищий рейтинг, що дає підстави рекомендувати його як пріоритетний (першочерговий) для будівництва.

При порівнянні отриманих результатів комбінованого методу і окремо МММА можна стверджувати, що ранжування, отриманими різними підходами ідентичні в разі, якщо пріоритет віддається безпековому фактору або потребам ділянки, що свідчить про надійність МММА.

7.4 Оцінка пріоритетності розвитку альтернативних ділянок метрополітену з використанням модифікованого методу морфологічного аналізу

Одним із важливих напрямків покращення транспортної ситуації в Одесі є розвиток ефективного громадського транспорту як альтернатива індивідуальним автомобільним перевезенням. У проєкт Генерального плану м. Одеси [139] закладені дві лінії метрополітену (як варіант – легкого метрополітену) із загальною протяжністю 37 км (рис. 7.20). На розрахунковий етап до 2031 р. була запланована для будівництва ділянка першої лінії («північ-південь») від житлового масиву імені Котовського до залізничного вокзалу (близько 18 км), яка

буде перетинати пересипську промислову зону й центральну частину міста. Ця ділянка затверджена в Генеральному плані, траса її чітко визначена. Усі інші траси (лінії) метрополітену є перспективними й можуть уточнюватися. Передбачалося, що перша лінія пройде до південно-західного житлового масиву в напрямку Люстдорфської дороги (рис. 7.20, кінцева станція 1), а загальна протяжність лінії складе 26,2 км. Друга лінія протяжністю 10,2 км може пройти від Фонтанської дороги (рис. 7.20, кінцева станція 2) до залізничного вокзалу (місця переходу з однієї на іншу лінію) і далі до західного промислового району.

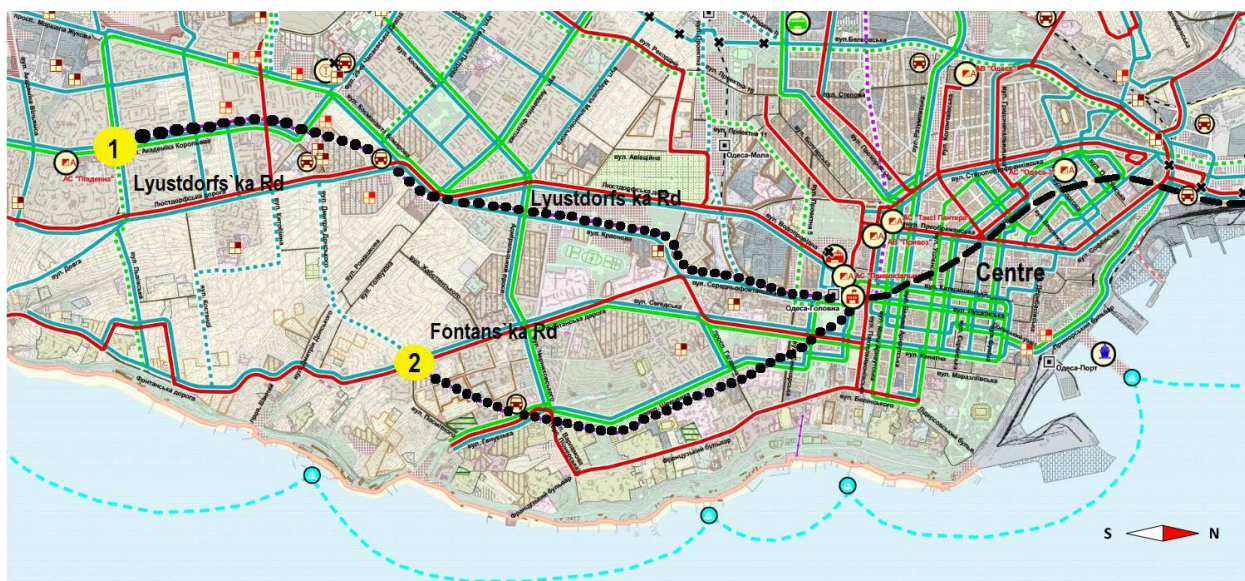


Рисунок 7.20 – Альтернативні шляхи і кінцеві станції метрополітену.

Ділянка 1 – кінцева станція “проспект академіка Глушкова” першої лінії метро;
ділянка 2 – кінцева станція “Фонтанна” другої лінії метро

Найбільш реалістичним на повоєнному етапі розвитку представляється проєкт метрополітену, який буде складатися лише з однієї осової лінії «північ-південь». При цьому «північна» ділянка першої лінії (від масиву імені Котовського до залізничного вокзалу) визначена однозначно. Подальша «південна» її частина може бути продовжена по трасі як першої лінії метрополітену (в напрямку Люстдорфської дороги), так і другої лінії (в напрямку Проспекту Т. Шевченка і Фонтанської дороги). Метою цього дослідження є системна порівняльна оцінка переваг та ризиків цих двох альтернативних маршрутів (їх кінцевих станцій) для забезпечення інвесторів, міської адміністрації, громадських організацій системним інструментарієм для прийняття

рішень щодо найбільш перспективного розвитку Одеського метрополітену і міста в цілому.

7.4.1 Адаптація морфологічної моделі

Для поставленої мети застосовувалась двоетапна процедура методу, в якій на першому етапі багатоаспектно досліджувалась ситуація в районі потенційної кінцевої станції метрополітену, а на другому етапі оцінювався очікуваний вплив на різні критичні фактори функціонування міста.

В якості об'єкта першого етапу дослідження були взяті території в радіусі 1 км (приблизна територія впливу) від розташування потенційної кінцевої станції метрополітену. Точні характеристики цієї ділянки важко визначити повною мірою; крім того, характеристики такої ділянки можуть бути різномірні по всій території, тому такий об'єкт має суттєву невизначеність, а отже, є сенс застосовувати МММА. Усього було взято 10 параметрів, які є найбільш критичними для визначення ступеню впливу станції метрополітену. Зазначені параметри зведені у морфологічну таблицю (табл. 7.20).

Стисло охарактеризуємо основні параметри та їх альтернативи, прийняті для аналізу. Так, тип урбаністичного середовища (параметр 1) буде визначати переважну функцію території навколо кінцевої станції. Будь який з них вочевидь покращить своє функціонування з появою станції метрополітену, проте різною мірою і з різним впливом на розвиток навколишньої території.

Від щільності населення території (параметр 2) буде значною мірою залежати кількість пасажирів, що будуть щоденно користуватися станцією метрополітену, рухаючись у справах та повертаючись до дому.

Таблиця 7.20 – Морфологічна таблиця структурно-функціональних факторів території впливу кінцевої станції метрополітену

Параметр	Альтернативи параметра
1. Тип урбаністичного середовища	1.1. «Діловий центр» (офісні та адміністративні споруди, ділові й культурні центри)
	1.2. «Старе місто» (історичні та архітектурні пам'ятки)
	1.3. «Спальний район» (типова житлова забудова)
	1.4. «Рекреаційна зона» (курортні об'єкти, парки, пляжі)
	1.5. «Торгівельна зона» (мегамаркети, оптові бази, великі ринки)
	1.6. «Промислова зона» (виробничі об'єкти, транспортні споруди, склади)
2. Щільність населення	2.1. До 150 осіб/га
	2.2. 150-250 осіб/га
	2.3. 250-450 осіб/га
	2.4. 450-540 осіб/га
	2.5. Позанормативна (більше 540 осіб/га)
3. Щільність магістральної мережі	3.1. 0,5-1 км/км ²
	3.2. 1-1,5 км/км ²
	3.3. 1,5-2 км/км ²
	3.4. 2-2,5 км/км ²
4. Мобільність туристів (відпочиваючих)	4.1. Низька (до 1 тис. осіб на добу)
	4.2. Середня (1-10 тис. осіб на добу)
	4.3. Висока (10-20 тис. на добу)
	4.4. Вельми висока (понад 20 тис. на добу)
5. Маятниковий рух працівників (на роботу – з роботи)	5.1. Низький
	5.2. Середній
	5.3. Високий
6. Доступність громадського транспорту	6.1. Низька
	6.2. Задовільна, крім часів «пік»
	6.3. Задовільна
7. Альтернативні типи громадського транспорту	7.1. Відсутні
	7.2. Суттєво обмежені
	7.3. Достатні
8. Середня швидкість руху автомобільного транспорту	8.1. До 20 км/год
	8.2. 20-30 км/год
	8.3. 30-50 км/год
9. Містобудівельний потенціал території	9.1. Низький
	9.2. Середній
	9.3. Високий
10. Наявність захисних споруд цивільного захисту	10.1. Значна невідповідність потребам
	10.2. Часткова невідповідність потребам
	10.3. Відповідність потребам

Щільність магістральної мережі (параметр 3) характеризує існуючий стан транспортної системи, чим вона менша (при інших рівних умовах), тим менше альтернативних маршрутів, тим більше автомобільних корок і простоїв, тим нижче швидкість руху автотранспорту і як результат – вища потреба в

будівництві лінії метрополітену. Слід зазначити, що середня щільність магістральної мережі на забудованій частині міста складає 1,29 км/км².

Мобільність туристів і відпочиваючих (параметр 4) має одночасно прямий і непрямий впливи, причому другий не завжди повною мірою простежуються в планувальних рішеннях. Перший, як видно з альтернативи параметра, це додаткова кількість пасажирів, які будуть користуватися метрополітеном або іншим видом транспорту, рухаючись у рекреаційні зони чи інші туристичні об'єкти. Другий – пов'язаний із потенціалом можливого суттєвого збільшення туристів по мірі розвитку рекреаційного будівництва й «пляжної індустрії» Одеси з відповідним навантаженням на транспортну систему. У передвоєнний час Одеса приймала до 3 млн. туристів на рік і це значною мірою загострювало транспортну проблему міста (до транспортних колапсів на окремих ділянках). Суттєвого зростання мобільності туристів у повоєнний час не можна очікувати без вирішення транспортної проблеми. Це формує системний трикутник взаємовпливів: мобільність туристів – рекреаційне будівництво – зручне розташування станцій метрополітену як вирішення транспортної проблеми.

Помітні впливи на транспортну систему здійснює «маятниковий рух» працівників на роботу – з роботи (параметр 5), що утворює так звані «години пік» – різке зростання руху, найбільші «корки» і простої автотранспорту. Цей параметр тісно пов'язаний із щільністю населення та структурою зайнятості. До війни у виробничій сфері було задіяні 34,6%, у невиробничій – 65,4. Основний напрямок «маятникового руху» для обох варіантів – з півдня на північ і зворотно, лише частина пасажирів (до 15–20%) охоплює всі інші напрямки (що підкреслює важливість осової лінії метрополітену).

Доступність існуючого громадського транспорту (параметр 6) та наявні альтернативні типи громадського транспорту (параметр 7) характеризують зручність транспортної логістики для пасажирів і, певною мірою, ступінь проблеми пасажирських перевезень на розглянутих територіях. Близьким до цих параметрів є середня швидкість руху автомобільного транспорту (параметр 8), але він додатково пов'язаний з екологічними проблемами міста – чим менша

швидкість і більше простоїв, тим більше автомобільних вихлопних викидів, екологічних та кліматичних проблем. Цей параметр також демонструє очевидну перевагу швидкості руху в метрополітені (у 2 рази і більше) електричним, екологічно чистим підземним транспортом.

Містобудівельний потенціал території (параметр 9) є важливим фактором нових можливостей будівельного розвитку відповідного району міста з появою там станції метрополітену. З одного боку він пов'язаний з наявністю вільних для забудови територій, можливістю заміни старих малоперспективних будинків сучасними, природними факторами (рельєф, природні об'єкти тощо), а з іншого – визначається привабливістю для інвесторів певних територій, їх пріоритетністю для будівельного освоєння (в залежності від перспектив формування ринкової вартості 1 м² будівлі на різних територіях). Цей параметр значною мірою пов'язаний з майбутнім розвитком району і міста в цілому, тому бачення концепту майбутнього міста буде впливати на оцінки цього параметра.

Наявність захисних споруд цивільного захисту (параметр 10) стала вагомим фактором впливу лише знедавна. Тривалий час вважалося, що велика війна із застосуванням конвенційної зброї в Європі вже неможлива. Сьогодні це є реальністю в Україні і розуміння важливості підземних захисних споруд для цивільного населення на випадок війни стає трендом майже для всіх сусідів Росії і не тільки для них. У Києві 46 підземних станцій Київського метрополітену працюють в режимі укриття цілодобово, під час ракетних обстрілів там перебувають десятки тисяч людей (приміром 29 травня 2023 р. – 41 тис. осіб). Враховуючи, що в окремі місяці повітряні тривоги лунали майже щоденно, функція Київського метрополітену як надійного сховища цивільної безпеки є вельми значимою. Ці можливості цивільного захисту мають бути враховані при плануванні розвитку сучасних міст.

На другому етапі були визначені п'ять основних типів впливу на функціонування міста від побудови станції метрополітену: вирішення транспортних проблем; сприяння містобудівельному розвитку; сприяння туристично-рекреаційному розвитку; мінімізація екологічних проблем; цивільний

захист населення. Для стандартизації у кожному факторі було використано чотири категорії сили впливу: незначний вплив; помірний вплив; суттєвий вплив; переважаючий вплив. При цьому слід зазначити, що альтернативи переважаючого впливу для мінімізації екологічних проблем, і незначного впливу для цивільного захисту населення були опущені, оскільки вони фактично є неможливими.

Таким чином, морфологічна таблиця другого етапу має вигляд, представлений в табл. 7.21.

Таблиця 7.21 – Морфологічна таблиця факторів впливу кінцевої станції метрополітену на функціонування міста

Параметр	Альтернативи параметра
А. Вирішення транспортної проблеми	А.1. Незначний вплив
	А.2. Помірний вплив
	А.3. Суттєвий вплив
	А.4. Переважаючий вплив
В. Сприяння містобудівельному розвитку	В.1. Незначний вплив
	В.2. Помірний вплив
	В.3. Суттєвий вплив
	В.4. Переважаючий вплив
С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку	С.1. Незначний вплив
	С.2. Помірний вплив
	С.3. Суттєвий вплив
	С.4. Переважаючий вплив
D. Мінімізація екологічних проблем	D.1. Незначний вплив
	D.2. Помірний вплив
	D.3. Суттєвий вплив
Е. Цивільний захист населення	Е.1. Помірний вплив
	Е.2. Суттєвий вплив
	Е.3. Переважаючий вплив

Для більш об'єктивної оцінки категорії впливу різних факторів були охарактеризовані вербально.

А. Вирішення транспортної проблеми (мобільності) для населення та туристів (відпочиваючих) на відповідній ділянці (радіус 1 км від станції):

А.1. Незначний вплив – станція майже не змінює конфігурацію транспортних потоків розглянутої території; існуючі транспортні проблеми вирішуються недостатньо.

А.2. Помірний вплив – станція частково розвантажує пасажиропотоки на відповідній ділянці, однак не стає суттєвим фактором в транспортній мережі; існуючі транспортні проблеми дещо послаблюються.

А.3. Суттєвий вплив – станція значно розвантажує пасажиропотоки на відповідній ділянці, стає важливим вузлом транспортної мережі; існуючі транспортні проблеми суттєво послаблюються.

А.4. Переважаючий вплив – станція переорієнтовує на себе основні пасажиропотоки на відповідній ділянці, значно розвантажуючи існуючу транспортну мережу; транспортні проблеми мешканців та туристів успішно вирішуються.

В. Сприяння містобудівельному розвитку відповідної території:

В.1. Незначний вплив – станція майже не відкриває нових перспектив розвитку розглянутої території міста (це може бути як через існуючу щільну забудову цієї ділянки, так і через її недостатню цікавість інвесторам);

В.2. Помірний вплив – станція певною мірою покращує привабливість території з точки зору її розвитку, збільшує вартість існуючої нерухомості, однак якісних змін не відбувається;

В.3. Суттєвий вплив – станція відкриває нові перспективи розвитку даної території міста, значно збільшуючи привабливість ділянки для інвестування та вартість нерухомості;

В.4. Переважаючий вплив – станція стає вирішальним фактором розвитку території, широкого будівництва інфраструктури, рекреаційної, готельної, ділової та житлової нерухомості високого рівня.

С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку даної території:

С.1. Незначний вплив – станція та навколишня територія не представляє особливого інтересу для туристів, використовуватиметься переважно місцевими жителями;

С.2. Помірний вплив – станція частково використовуватиметься туристами, однак не є важливим фактором туристично-рекреаційного розвитку;

С.3. Суттєвий вплив – станція стане важливим вузлом для мобільності туристів і відпочиваючих, суттєво покращуючи туристично-рекреаційну привабливість території;

С.4. Переважаючий вплив – станція відкриває нові вагомі перспективи туристично-рекреаційного розвитку території.

Д. Захист природного середовища (мінімізація екологічних проблем):

Д.1. Незначний вплив – станція та пов'язана з нею зміна транспортної мережі помітно не вплине на навколишнє екологічне середовище;

Д.2. Помірний вплив – станція та пов'язана з нею розвантаження транспортної мережі певною мірою покращить екологічну ситуацію на даній території;

Д.3. Суттєвий вплив – станція та пов'язана з нею розвантаження транспортної мережі значною мірою покращить екологічну ситуацію на даній території.

Е. Цивільний захист населення (на випадок воєнних чи терористичних атак):

Е.1. Помірний вплив – станція має певний потенціал як укриття цивільного захисту для мешканців навколишніх вулиць;

Е.2. Суттєвий вплив – станція має значний потенціал як укриття цивільного захисту для мешканців і туристів, що перебувають на даній території;

Е.3. Переважаючий вплив – станція стане головною спорудою цивільного захисту на даній території.

Наступним кроком побудови моделі в МММА є оцінювання взаємозв'язків параметрів першої морфологічної таблиці, і оцінювання зв'язків між параметрами першої і другої морфологічної таблиці. Ця процедура проводилась шляхом експертного опитування. Для зменшення навантаження на експертів деякі блоки питань були опущені у випадку явно відсутньої залежності між відповідними параметрами. Таким чином, наявні зв'язки між параметрами 1–10, А–Е з табл. 7.20–7.21 наведені в табл. 7.22.

Таблиця 7.22 – Наявність або відсутність зв'язків між параметрами морфологічних таблиць (позначка «+» означає, що зв'язок між параметрами присутній, порожня клітинка – відсутній)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	A	B	C	D	E
1			+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
2			+		+	+	+	+		+	+	+			+
3	+	+		+	+	+	+	+	+		+	+		+	
4	+		+			+	+	+	+	+	+	+	+		+
5	+	+	+			+	+	+			+			+	
6	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		
7		+	+	+	+	+		+	+		+		+		
8	+	+	+	+	+	+	+		+		+			+	
9	+		+	+		+	+	+		+	+	+	+		
10	+	+		+					+				+		+

7.4.2 Результати розрахунків

За допомогою двоетапної процедури МММА було опрацьовано 349920 згенерованих морфологічною таблицею першого етапу конфігурацій. Результати першого етапу методу показані в табл. 7.23. В таблиці наведені початкові значення, отримані експертним шляхом, і обчислені за допомогою процедури МММА значення, що враховують взаємозв'язки між параметрами (табл. 7.22). Тут і далі під «Ділянкою 1» розуміється кінцева станція в районі Люстдорфської дороги; під «Ділянкою 2» – кінцева станція в районі Фонтанської дороги.

На другому етапі МММА були обчислені оцінки впливу структурно-функціональних факторів на різні аспекти функціонування міста. Результати розрахунків наведені в табл. 7.24.

Таблиця 7.23 – Вхідні і уточнені з урахуванням взаємозв'язків оцінки параметрів морфологічної таблиці структурно-функціональних факторів

Параметр	Альтернативи параметра	Нормовані вхідні дані		Уточнені за МММА дані	
		Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 1	Ділянка 2
1. Тип урбаністичного середовища	1.1. «Діловий центр»	0,087	0,114	0,129	0,100
	1.2. «Старе місто»	0	0	0,000	0,000
	1.3. «Спальний район»	0,348	0,200	0,518	0,222
	1.4. «Рекреаційна зона»	0	0,457	0,000	0,388
	1.5. «Торгівельна зона»	0,283	0,114	0,315	0,276
	1.6. «Промислова зона»	0,283	0,114	0,038	0,014
2. Щільність населення	2.1. До 150 осіб/га	0,091	0,432	0,020	0,339
	2.2. 150-250 осіб/га	0,295	0,351	0,118	0,367
	2.3. 250-450 осіб/га	0,364	0,108	0,577	0,206
	2.4. 450-540 осіб/га	0,159	0,108	0,219	0,087
	2.5. Більше 540 осіб/га	0,091	0	0,066	0,000
3. Щільність магістральної мережі	3.1. 0,5-1 км/км ²	0,175	0,259	0,018	0,083
	3.2. 1-1,5 км/км ²	0,400	0,593	0,334	0,797
	3.3. 1,5-2 км/км ²	0,325	0,148	0,596	0,120
	3.4. 2-2,5 км/км ²	0,100	0	0,053	0,000
4. Мобільність туристів (відпочиваючих)	4.1. Низька	0,593	0	0,108	0,000
	4.2. Середня	0,259	0,194	0,764	0,693
	4.3. Висока	0,148	0,361	0,128	0,224
	4.4. Вельми висока	0	0,444	0,000	0,083
5. Маятниковий рух працівників	5.1. Низький	0,111	0,552	0,004	0,207
	5.2. Середній	0,444	0,448	0,647	0,793
	5.3. Високий	0,444	0	0,349	0,000
6. Доступність громадського транспорту	6.1. Низька	0,148	0,481	0,020	0,098
	6.2. Задовільна, крім часів «пік»	0,593	0,259	0,950	0,855
	6.3. Задовільна	0,259	0,259	0,030	0,047
7. Альтернативні типи громадського транспорту	7.1. Відсутні	0	0,148	0,000	0,026
	7.2. Суттєво обмежені	0,350	0,593	0,284	0,761
	7.3. Достатні	0,650	0,259	0,716	0,213
8. Середня швидкість руху автомобільного транспорту	8.1. До 20 км/год	0,194	0,361	0,061	0,216
	8.2. 20-30 км/год	0,444	0,444	0,835	0,742
	8.3. 30-50 км/год	0,361	0,194	0,104	0,042
9. Місто-будівельний потенціал території	9.1. Низький	0,696	0,233	0,127	0,090
	9.2. Середній	0,304	0,533	0,873	0,874
	9.3. Високий	0	0,233	0,000	0,036
10. Наявність захисних споруд цивільного захисту	10.1. Значна невідповідність потребам	0,361	0,552	0,182	0,202
	10.2. Часткова невідповідність потребам	0,444	0,448	0,794	0,798
	10.3. Відповідність потребам	0,194	0	0,024	0,000

Таблиця 7.24 – Оцінки впливу побудови кінцевої станції метрополітену за одним із двох варіантів

Параметр	Альтернативи параметра	Ділянка 1	Ділянка 2
А. Вирішення транспортної проблеми	А.1. Незначний вплив	0,050	0,076
	А.2. Помірний вплив	0,451	0,481
	А.3. Суттєвий вплив	0,449	0,409
	А.4. Переважаючий вплив	0,050	0,035
В. Сприяння містобудівельному розвитку	В.1. Незначний вплив	0,069	0,042
	В.2. Помірний вплив	0,527	0,371
	В.3. Суттєвий вплив	0,368	0,483
	В.4. Переважаючий вплив	0,035	0,105
С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку	С.1. Незначний вплив	0,243	0,151
	С.2. Помірний вплив	0,484	0,426
	С.3. Суттєвий вплив	0,211	0,305
	С.4. Переважаючий вплив	0,062	0,118
D. Мінімізація екологічних проблем	D.1. Незначний вплив	0,108	0,044
	D.2. Помірний вплив	0,447	0,431
	D.3. Суттєвий вплив	0,445	0,526
Е. Цивільний захист населення	Е.1. Помірний вплив	0,440	0,427
	Е.2. Суттєвий вплив	0,449	0,433
	Е.3. Переважаючий вплив	0,111	0,140

Розглянемо окремо кожний з факторів впливу.

В оцінках параметра «А. Вирішення транспортної проблеми» в діапазонах «суттєвий вплив» і «переважаючий вплив» більшу перевагу має ділянка 1 (рис. 7.21). Це можна пояснити більшою щільністю населення території навколо запланованої кінцевої станції метрополітену ділянки 1. Тут характерна багатоповерхова забудова, включно з висотними будинками, тоді як частину забудови ділянки 2 складають одноквартирні будинки (садиби). Крім того для ділянки 1 більш значним є вплив «маятникового руху» працівників на роботу – з роботи із врахуванням місць прикладання праці. Інші параметри впливу або мають близькі значення, або дають переваги ділянці 2, проте меншою мірою. Оскільки для дослідження ділянки 2 розглядалася територія радіусом 1 км від потенційного місця закладання кінцевої станції, то сюди не потрапили розташовані трохи далі і щільно населенні житлові висотні комплекси курортного району Аркадія. Але при реалізації проєкту транспортної лінії 2, мешканці

Аркадії будуть активно користуватися метрополітенем, що зближить потенціал обох варіантів за параметром «Вирішення транспортної проблеми».

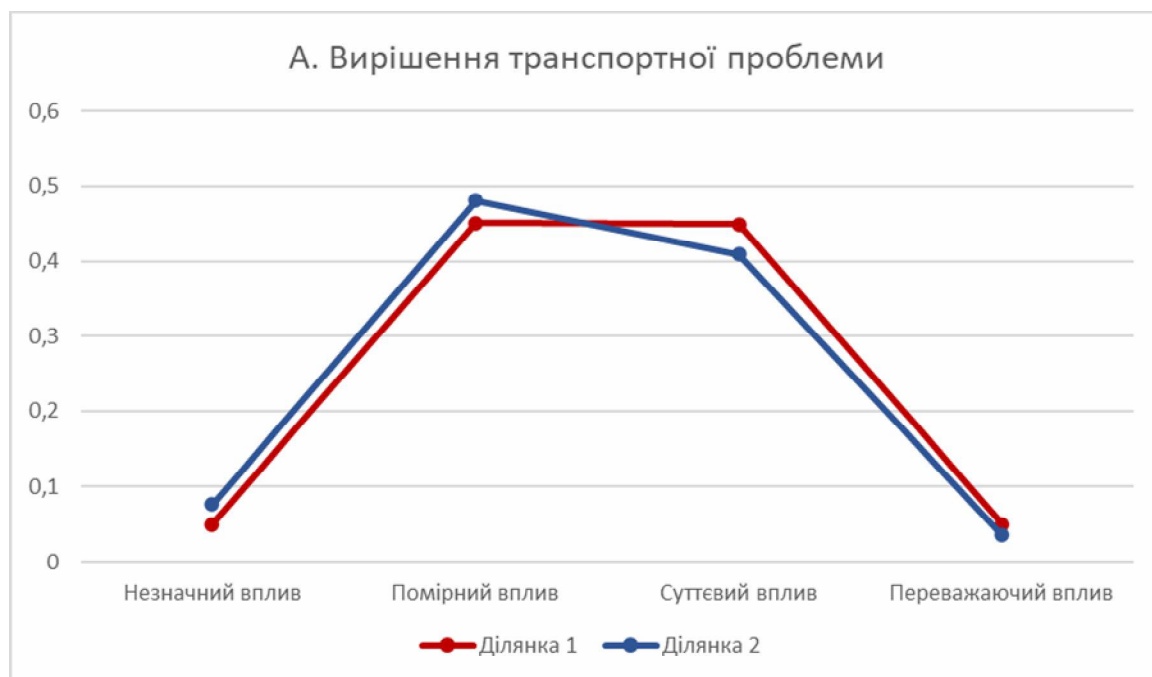


Рисунок 7.21 – Результати оцінювання варіантів за параметром «А. Вирішення транспортної проблеми»

Для параметрів «В. Сприяння містобудівельному розвитку» і «С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку» в діапазонах «суттєвий вплив» і «переважаючий вплив» першість має ділянка 2 (рис. 7.22, 7.23). Слід зауважити, що Генеральний план міста Одеси (до 2031 р.) не передбачає значного зростання будівництва в зазначених районах. На це впливає загальна висока щільність населення міста, яка в 2–2,3 рази перевищує показники інших великих міст України (включно з Києвом), вельми обмежені вільні ділянки для будівництва, природні фактори (зокрема потреба захисту берегових схилів) та транспортні проблеми цих районів. З іншого боку, напрямок Фонтанської дороги, який наближений до моря (йде вздовж нього), є зоною значних інтересів вітчизняних та зарубіжних інвесторів. Рекреаційне господарство, туризм, об'єкти сфери обслуговування і зараз є пріоритетними напрямками інвестиційної діяльності в місті. Створення лінії метрополітену вздовж південної частини одеського узбережжя здатне різко збільшити обсяги будівельних інвестицій у ці сфери. При цьому крім розвитку існуючих пляжних районів (загальна площа морських пляжів

міста сягає 56 га) в середній перспективі можуть з'явитися нові великі рекреаційні зони в південному напрямку, що пов'язано з можливістю продовження альтернативної лінії метро в напрямку Фонтанської дороги. Проблема земельних ділянок може частково вирішуватися за рахунок будинків 1960-х років (так званих «хрущовок»), експлуатаційний ресурс яких вже закінчується та за рахунок одноквартирних садибних будинків (проте Генеральний план суттєво обмежує вибуття садибної забудови – на рівні 2,2%). Ще один перспективний напрямок – це масштабна реконструкція (перебудова) застарілих рекреаційних об'єктів ХХ ст. (санаторіїв, готелів, баз відпочинку), які вже не забезпечують високий рівень комфорту та послуг і не витримують конкуренції з сучасними рекреаційними зонами сусідньої Туреччини.

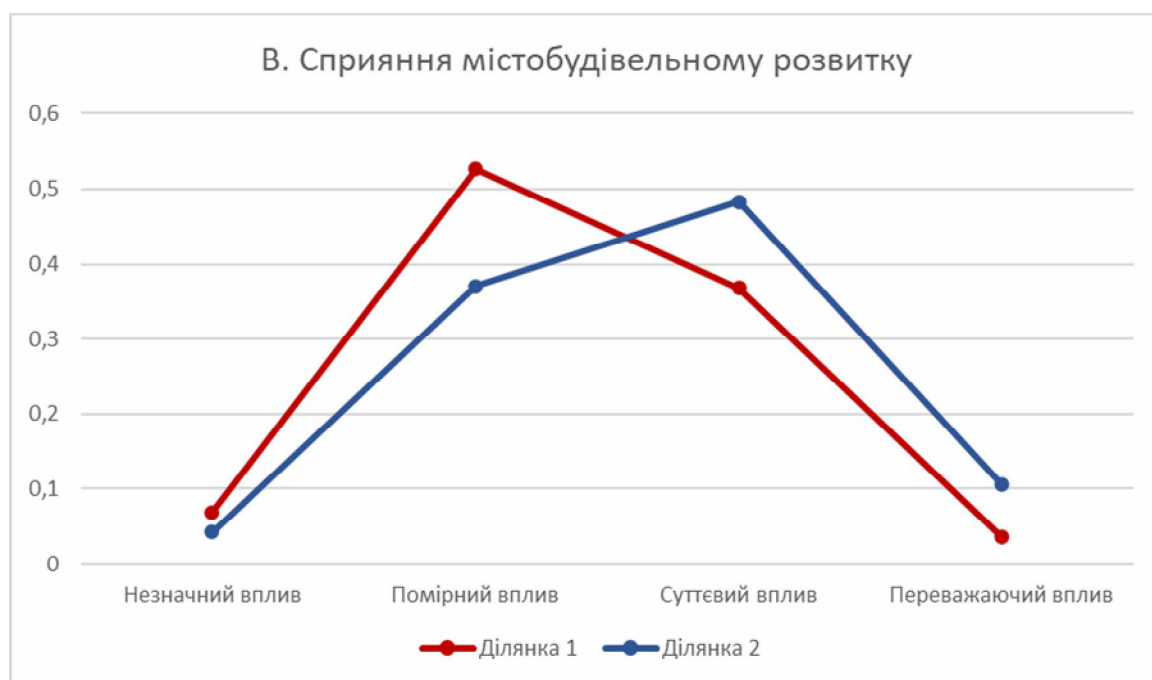


Рисунок 7.22 – Результати оцінювання ділянок за параметром «В. Сприяння містобудівельному розвитку»

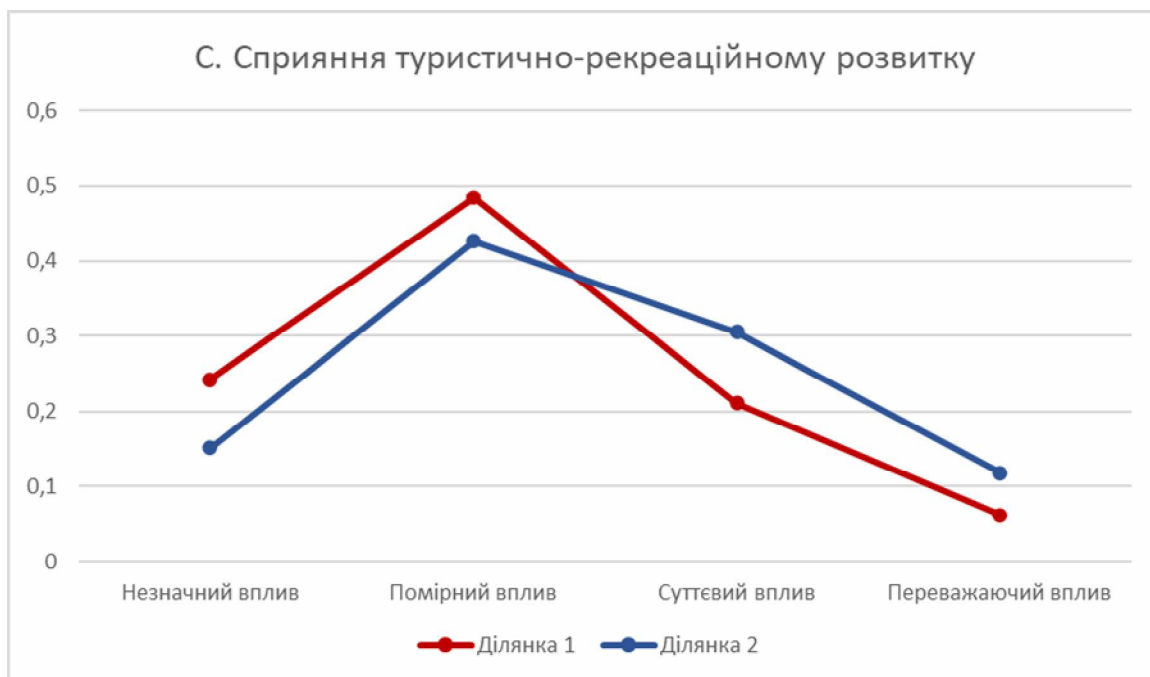


Рисунок 7.23 – Результати оцінювання ділянок за параметром «С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку»

Параметр «D. Мінімізація екологічних проблем» має провідне значення для реалізації сучасного «зеленого переходу» та кліматичної нейтральності міст європейської спільноти (Взаємозв'язків також позиціонує себе на цьому шляху). Оскільки до 80% шкідливих викидів у містах здійснюється автомобільним транспортом, а широке використання пасажирами лінії метрополітену здатне в рази скоротити його застосування для пасажирських перевезень (переважно скорочуючи потребу в індивідуальному автотранспорті), то позитивний екологічний вплив буде відчутним на обох альтернативних напрямках (рис. 7.24). Показник суттєвого впливу вищий для ділянки 2, що пояснюється близькістю до моря, ландшафтно-рекреаційних територій, курортних об'єктів (зокрема, до курортного району Аркадія).

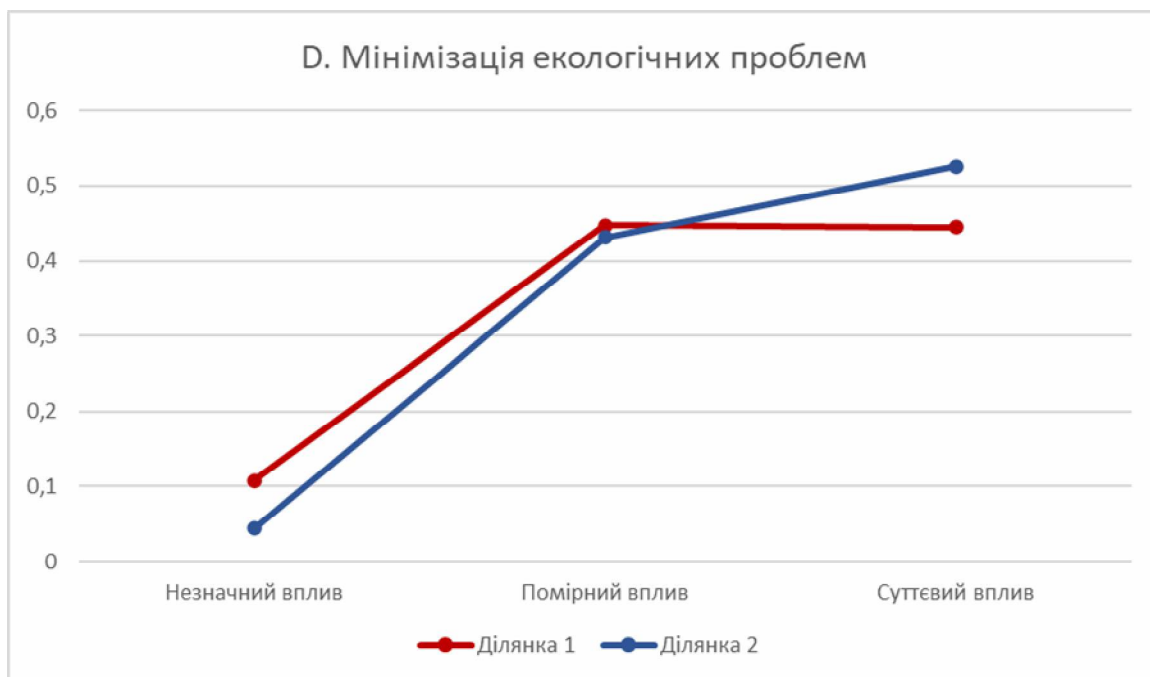


Рисунок 7.24 – Результати оцінювання ділянок за параметром «D. Мінімізація екологічних проблем»

Параметр «E. Цивільний захист населення» також показує наближені один до одного графіки оцінювання обох ділянок з невеликою перевагою ділянки 2 (рис. 7.25).

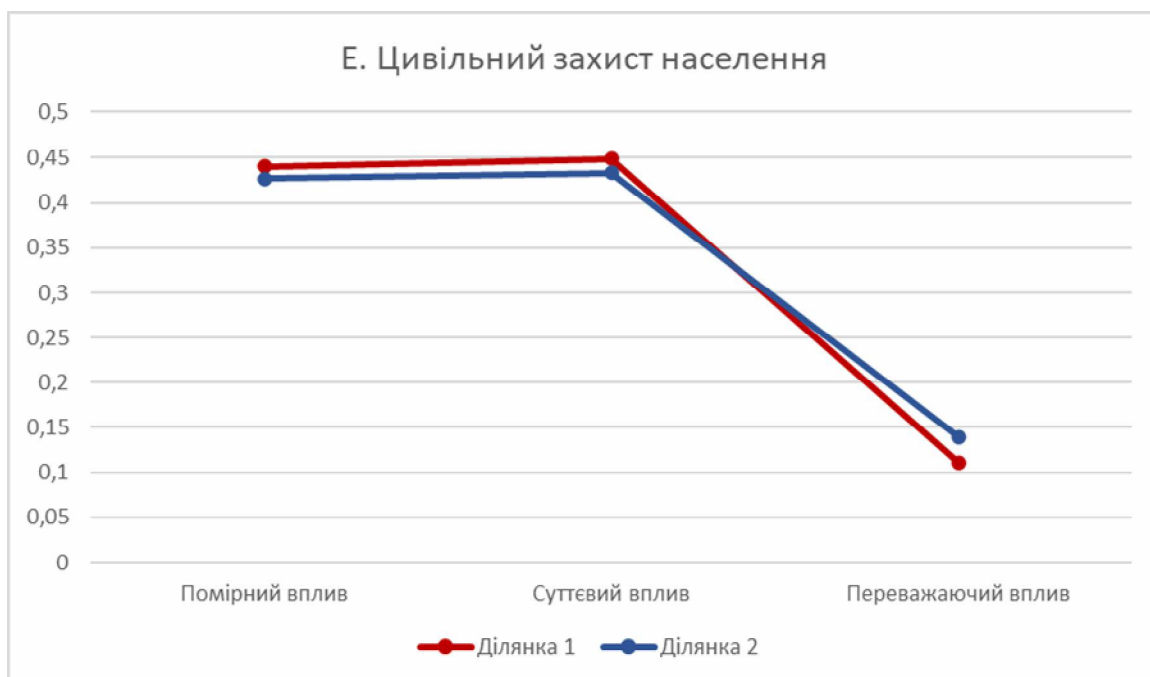


Рисунок 7.25 – Результати оцінювання ділянок за параметром «E. Цивільний захист населення»

Для обох ділянок переважають альтернативи параметрів «значна або часткова невідповідність потребам цивільного захисту». В обох випадках станція метрополітену, а при необхідності і перегінні тунелі, можуть забезпечити надійне укриття цивільного населення прилеглої до станції території та туристів. Невелика перевага ділянки 2 зумовлена тут більшою гостротою проблеми, що пов'язано із значною кількістю одноквартирних садибних будинків (без захисних укриттів) і великої кількості відвідувачів рекреаційної зони, яким потрібен надійний захист у разі терористичних або воєнних загроз.

Для кращої візуалізації результатів і порівняння впливу вибору ділянок на різні фактори введемо наступний узагальнюючий коефіцієнт: w_{ratio} , аналогічний описаному в п. 7.3.2. Більші значення цього коефіцієнта свідчать про більш значний потенційний вплив вибору ділянки на відповідний фактор. Розраховані коефіцієнти w_{ratio} для обох ділянок і кожного з факторів наведені у вигляді діаграми на рис. 7.26.

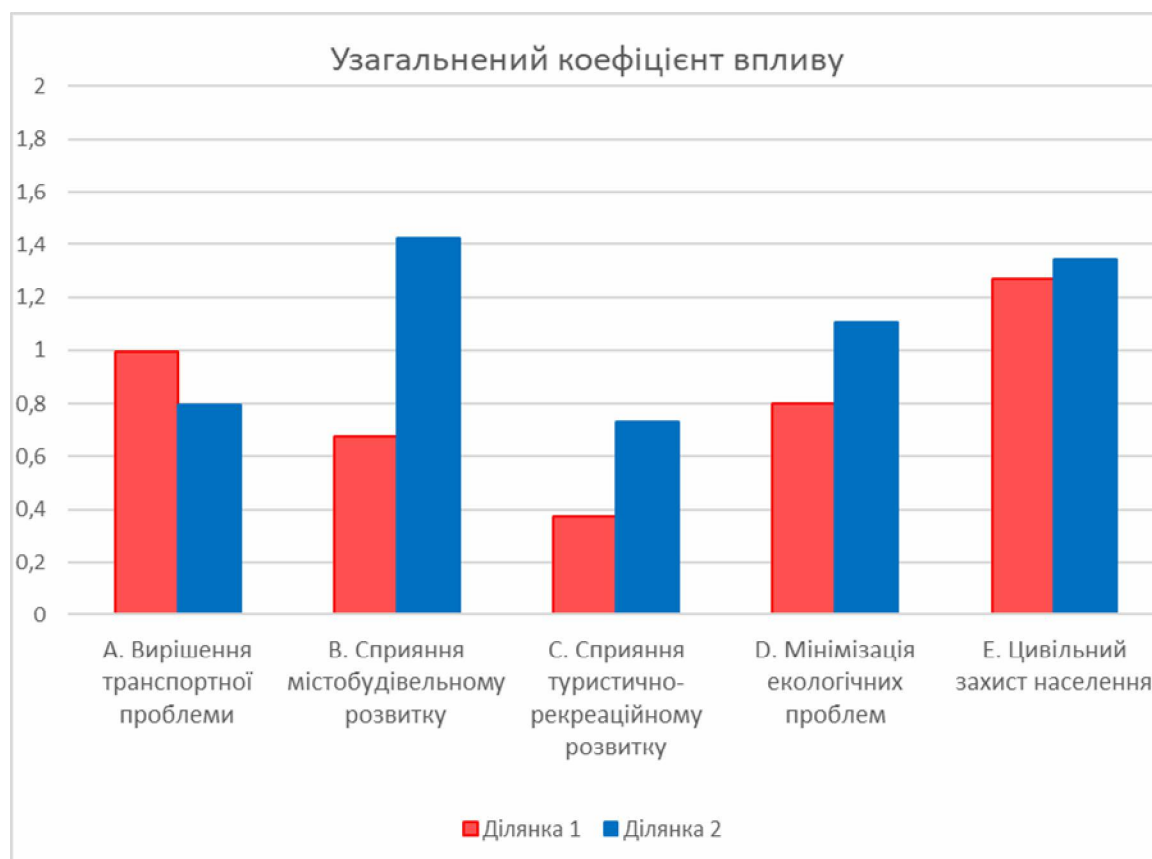


Рисунок 7.26 – Коефіцієнт впливу w_{ratio} обох ділянок для різних факторів

З результатів моделювання можна зробити висновок, що альтернативна лінія метро (локація 2) більшою мірою узгоджується з ширшими, ніж суто транспортні, цілями стійкого міського планування: більшими інвестиційними перспективами будівництва (що зумовлено близькістю до берегової смуги), формуванням потужної системи територій рекреаційного, оздоровчого та туристичного призначення, формуванням нових хабів для розміщення ділової активності, центр якої може переміститися з історичної в модерну південно-східну частину міста. Крім того, прибережна туристична й оздоровча зона особливо потребує вирішення екологічних проблем, пов'язаних з мінімізацією масових викидів вихлопних газів на перевантажених автомагістралях. Зручна, наближена до морських рекреаційних об'єктів лінія метрополітену здатна різко скоротити кількість приватного автомобільного транспорту на південних магістралях міста (у першу чергу – на проспекті Шевченка та Фонтанській дорозі), що призведе до ліквідації автодорожніх корок, простоїв і аварій, збільшить середню швидкість автомобільного руху й скоротить сумарні викиди газів, що сприятиме покращенню екологічної ситуації та кліматичній нейтральності міського транспорту. Таким чином поєднання лінії метро з автомобільним транспортом суттєво покращить умови його функціонування, а також помітно розвантажить трамвайну лінію від пляжної зони Аркадія до центру, яка в туристичний сезон критично перевантажена. Також слід зазначити, що станції метрополітену здатні забезпечити надійний захист цивільного населення від ударів з повітря і роблять прибережний район більш стійким до умов війни, ризик повторення якої не можна виключати.

7.4.3 Аналіз чутливості

Для підвищення довіри до результатів і визначення найбільш критичних елементів моделі було проведено аналіз чутливості (див. підрозділ 2.1). Аналіз чутливості проводився відносно узагальнюючого коефіцієнта w_{ratio} як найбільш інтегрального показника якості ділянки.

Чутливість вхідних даних розглядалась на прикладі кожного з факторів А–Е, причому розглядалися два типи чутливості:

- чутливість типу I – збурення вхідних даних, що призводить до значення $w_{ratio} = 1$, тобто зміни класифікації ділянки як впливової або невливової за відповідним фактором;
- чутливість типу II – збурення вхідних даних, що призводить до рівності значення w_{ratio} для обох ділянок, тобто зміни в перевазі однієї ділянки над іншою.

Результати аналізу наведені в табл. 7.25. Для кращого сприйняття результатів обчислені критичні збурення вхідних даних $\Delta p_j^{(i)}$ були переведені у приблизну кількість рівнів шкали, на яку експерт мав помилитися, щоб відбулося відповідне збурення, за такою схемою: $|\Delta p_j^{(i)}| \leq 0,1$ – помилка в межах одного рівня шкали; $0,1 < |\Delta p_j^{(i)}| \leq 0,3$ – помилка в один рівень шкали (в сторону збільшення або зменшення); $0,3 < |\Delta p_j^{(i)}| \leq 0,5$ – помилка в два рівні шкали, тощо. Якщо потрібне збурення виходило за межі допустимого діапазону (тобто вимагало експертної оцінки, меншої за 0, або більшої за 1, що недопустимо), відповідне відношення позначалось як стійке (С), або відносно стійке (ВС), у випадку, якщо обчислене збурення було відносно невелике ($|\Delta p_j^{(i)}| \leq 0,5$). Оцінки, позначені як відносно стійкі, самі по собі не можуть призвести до зміни результату, але вони є більш чутливими, і потенційно можуть вплинути на результат, якщо буде змінено одночасно декілька оцінок, тому вони можуть потребувати більшої уваги.

Аналіз чутливості не проводився для альтернатив, що мали вхідне значення 0, або для тих, що не впливали на відповідний фактор (згідно з табл. 7.22); в табл. 7.25 такі оцінки відмічені позначкою «х».

Таблиця 7.25 – Аналіз чутливості моделі¹

Пар-р	Альт-ва	Ділянка 1					Ділянка 2				
		А	В	С	Д	Е	А	В	С	Д	Е
1.	1.1	С	С	С	С/ВС	ВС/С	С	С	ВС/С	С/+4	С
	1.2	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
	1.3	С	С	С	С	С	С	ВС/С	-0/С	С/ВС	С
	1.4	х	х	х	х	х	С	ВС/С	+0/ВС	С/+3	С
	1.5	С	С	С	С	-1/С	С	С	ВС/С	С	С
	1.6	С	С	С	С	С	С	С	-0/С	С	С
2.	2.1	ВС/С	+2/С	х	х	+1/С	С	-2/С	х	х	С
	2.2	ВС/С	С	х	х	+2/С	С	С	х	х	С
	2.3	С	С	х	х	ВС/С	ВС/С	С	х	х	С
	2.4	С	ВС/С	х	х	-0/С	ВС	+3/С	х	х	ВС
	2.5	С	ВС	х	х	ВС/С	х	х	х	х	х
3.	3.1	С	ВС	х	С/+2	х	ВС/С	С	х	С/ВС	х
	3.2	С	С	х	С	х	С	-3/С	х	С	х
	3.3	С	С	х	С/-2	х	+2/С	ВС/С	х	С/+2	х
	3.4	ВС/С	С	х	ВС	х	х	х	х	х	х
4.	4.1	-3/С	С	С	х	+1/-3	х	х	х	х	х
	4.2	С	С	С	х	-0/С	С	С	-0/С	х	С
	4.3	С	С	С	х	-0/С	С	С	-2/С	х	С
	4.4	х	х	х	х	х	ВС/С	С	+1/С	х	С
5.	5.1	С	х	х	С/ВС	х	С	х	х	С/-1	х
	5.2	С	х	х	-2/-1	х	С	х	х	С/+2	х
	5.3	С	х	х	С/+1	х	х	х	х	х	х
6.	6.1	С	х	С	х	х	С	х	-0/С	х	х
	6.2	С	х	С	х	х	С	х	+1/С	х	х
	6.3	С	х	С	х	х	ВС/С	х	+0/С	х	х
7.	7.1	х	х	х	х	х	ВС	х	ВС	х	х
	7.2	С	х	С	х	х	С	х	-1/С	х	х
	7.3	С	х	С	х	х	+3/С	х	+1/С	х	х
8.	8.1	С	х	х	С/+1	х	-1/С	х	х	С/-1	х
	8.2	С	х	х	С	х	С	х	х	С	х
	8.3	ВС/С	х	х	ВС/-1	х	+1/С	х	х	ВС/+1	х
9.	9.1	С	С	С	х	х	ВС/С	С	С	х	х
	9.2	С	С	С	х	х	С	С	-1/С	х	х
	9.3	х	х	х	х	х	С	ВС/С	+0/С	х	х
10.	10.1	х	х	С	х	+1/С	х	х	-2/С	х	С
	10.2	х	х	С	х	+1/С	х	х	+2/С	х	С
	10.3	х	х	С	х	-0/С	х	х	х	х	х

¹ Значення дані у відповідній помилці в кількості рівнів шкали відповіді на питання, яка призведе до зміни результату. Знак показує напрям збурення, що до цього призведе – зменшення (-) або збільшення (+) вхідного значення. Чутливості типу I і II розділені знаком '/'; в разі, якщо вони співпадають, дається тільки одне значення. «С» означає стійкість відношення, «ВС» – відносну стійкість, «х» – незастосовність аналізу чутливості до пари.

Табл. 7.25 показує, що в цілому результати достатньо нечутливі до збурень окремих вхідних оцінок, особливо для параметрів, за якими ділянки мають суттєво відмінні результати (фактори А, В). Як і очікувалось, найбільш чутливими

параметрами за типом I стали ті, де коефіцієнт w_{ratio} близький до 1 – параметр «Е. Цивільний захист населення» для ділянки 1, і параметр «С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку» для ділянки 2. В обох випадках, структуру результату доцільно вивчити детальніше: для параметра С ділянки 2 альтернатива «С.4. Переважаючий вплив» має більшу оцінку, ніж «С.1. Незначний вплив», що схиляє шальки терезів на користь того, що вона скоріше буде впливовою за цим фактором.

За типом II найбільш чутливим є фактор «D. Мінімізація екологічних проблем». Майже всі релевантні параметри можуть змістити баланс, тому можна сказати, що обидві ділянки мають приблизно рівний вплив на цей параметр.

Більшість інших відношень демонструють або стабільність, або вимагають невірогідних збурень у вхідних даних для зміни результату. Слід зазначити, що експертна помилка в один рівень шкали є цілком можливою, в два рівні шкали вже є досить малоюмовірною, а в три і більше рівні практично неможливою. Тому можна зробити висновок, що отримані результати є достатньо надійними.

7.5 Порівняння урбаністичних об'єктів з точки зору протидії небажаним подіям і їх наслідкам

Модель, описана в підрозділі 6.4, була використана для об'єктів критичної міської інфраструктури, а саме комплексу трубних, і тунельного каналізаційних дюкерів, прокладених по дну Дніпра.

Вхідні оцінки альтернатив параметрів небажаних подій, а також результати врахування матриці взаємозв'язків процедурою МММА для цих оцінок наведені в табл. 7.26. В стовпчику «Труби» наведені оцінки для трубного дюкера, прокладеного по дну р. Дніпро, в стовпчику «Дюкер» – відповідні оцінки для підземного (тунельного) каналізаційного дюкера.

Таблиця 7.26 – Вхідні нормовані ймовірності небажаних подій і результати врахування матриці взаємозв'язків

Параметр	Альтернатива	Вхідні нормовані оцінки		Оцінки після врахування взаємозв'язків	
		Труби	Дюкер	Труби	Дюкер
1. Тип небажаної події	1.1 Вибух	0,232	0,212	0,440	0,107
	1.2 Пожежа	0,000	0,030	0,000	0,022
	1.3 Зсуви, провали та просідання ґрунту	0,286	0,303	0,198	0,366
	1.4 Погодні катаклізми	0,071	0,030	0,002	0,000
	1.5 Пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту	0,232	0,303	0,247	0,414
	1.6 Порушення функціонування без конструктивних пошкоджень	0,179	0,121	0,113	0,090
2. Походження небажаної події	2.1 Антропогенне зі злим умислом	0,372	0,250	0,550	0,154
	2.2 Антропогенне без злого умислу	0,163	0,036	0,006	0,001
	2.3. Технічне, технологічне	0,302	0,464	0,409	0,631
	2.4 Природне	0,163	0,250	0,035	0,214
3. Масштаб впливу небажаної події	3.1 Окремий структурний або функціональний елемент об'єкта, або окрема обмежена ділянка	0,019	0,500	0,056	0,617
	3.2 Декілька структурних або функціональних елементів об'єкта, або декілька ділянок	0,019	0,313	0,053	0,368
	3.3 Об'єкт повністю	0,302	0,125	0,533	0,015
	3.4 Об'єкт і сусідні до нього	0,302	0,031	0,197	0,000
	3.5 Район міста і більше	0,358	0,031	0,160	0,000

Переведені в числову форму результати експертного оцінювання зв'язків параметрів небажаних подій і їх наслідків наведені в таблицях 7.27, 7.28. Зазначимо, що деякі типи подій не розглядались для відповідних об'єктів, тому в таблицях є незаповнені стовпчики.

Таблиця 7.27 – Матриця зв'язків для трубного дюкера

		1					2				3					
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
А	А.1	-1		-0,8	-0,2	-1	1	-1	-0,8	-0,8	0,5	-0,5	-0,8	-1	-1	-1
	А.2	-1		0,8	0,2	0,5	-1	-1	0,2	0,2	0,8	0,5	0,2	-1	-1	-1
	А.3	0,8		0,5	0,2	1	-1	1	0,5	0,8	0,5	0,8	0,8	0,2	0,2	0,2
	А.4	0,5		-0,8	0,2	0,5	-1	0,8	-0,8	0,8	-0,8	-1	-0,5	1	1	1
Б	Б.1	-1		-0,2	-0,2	-1	-1	-1	-0,8	-0,5	-0,2	-0,8	-1	-1	-1	-1
	Б.2	-0,8		-0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,8	-0,5	0,2	0,2	0,2	-0,2	-1	-1	-1
	Б.3	1		0,2	0,2	0,8	0,5	1	0,5	0,5	0,2	0,8	0,8	1	1	1
В	В.1	-1		-0,5	-0,2	-0,8	-0,5	-1	-0,2	-0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,8	-1	-1
	В.2	-1		0,8	0,5	0,2	0,5	-0,5	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	-0,2	-0,5	-0,8
	В.3	0,2		0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2
	В.4	1		0,2	0,2	0,8	-0,5	1	-0,2	0,8	0,2	-0,8	-0,2	0,8	1	1
Г	Г.1	-1		-1	-0,5	-1	-0,8	-1	-0,5	-1	-0,2	-0,8	-1	-1	-1	-1
	Г.2	-0,8		-0,8	-0,2	0,2	0,2	-0,5	0,2	-0,2	0,2	-0,5	-0,5	-0,8	-1	-1
	Г.3	0,8		0,2	0,8	0,5	0,5	0,2	0,8	0,5	0,5	0,8	0,5	-0,2	-0,5	-0,8
	Г.4	0,2		0,8	0,2	0,8	0,8	0,8	0,2	1	0,2	0,5	0,8	0,8	0,8	0,5
	Г.5	0,2		-0,8	-0,8	0,2	-0,5	0,8	-0,5	-0,2	-0,5	-0,8	-0,5	0,5	0,8	1
Д	Д.1	0,2		0,8	0,5	0,5	0,8	-0,2	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Д.2	0,2		0,2	0,2	-0,2	-0,2	0,5	-0,5	-0,8	-0,2	-1	-1	-0,8	-1	-1
	Д.3	-1		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	Д.4	-1		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	Д.5	-1		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Е	Е.1	-1		-0,8	-0,5	-1	-0,8	-1	-0,8	-1	-0,5	-0,8	-1	-1	-1	-1
	Е.2	-1		-0,5	-0,2	-0,8	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1	-1
	Е.3	0,2		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1
	Е.4	0,8		0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,5
	Е.5	1		0,8	0,5	1	0,5	1	0,5	0,8	0,5	0,5	0,8	1	1	1
Ж	Ж.1	-1		-0,8	0,2	-0,2	0,2	-1	-0,2	-1	-0,2	-0,2	-0,5	-1	-1	-1
	Ж.2	0,2		1	0,5	0,8	0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	0,8	0,5	-0,2	-0,5	-0,8
	Ж.3	0,8		-0,2	-0,5	0,2	-0,2	0,8	-0,5	0,8	-0,2	0,2	0,5	0,5	0,8	0,5
	Ж.4	1		-0,8	-0,8	-0,5	-0,8	1	-1	0,2	-1	-0,8	-0,5	0,8	1	1
З	З.1	-1		-0,5	-0,5	-1	0,8	-1	-0,5	-1	-0,5	-0,8	-0,8	-1	-1	-1
	З.2	-0,8		0,8	0,5	0,5	0,2	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,2	-0,5	-0,8	-1
	З.3	0,8		0,2	-0,2	0,8	-0,8	0,8	0,2	0,8	-0,2	0,5	1	0,8	1	1
	З.4	1		-0,5	-0,8	0,2	-1	1	-0,8	0,2	-0,8	-0,2	0,8	1	1	1

Таблиця 7.28 – Матриця зв'язків для тунельного дюкера

		1						2				3				
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
А	А.1	-0,2	0,2	-0,5		-0,8	1	-0,5	0,2	-0,5		-0,2	-0,8	-1	-1	-1
	А.2	0,2	0,5	0,5		0,5	-0,8	0,2	0,5	0,5		0,8	0,5	-1	-1	-1
	А.3	0,8	0,2	0,5		0,5	-0,8	0,8	0,2	0,8		0,5	1	0,8	0,5	0,2
	А.4	-0,8	-0,8	-1		-0,8	-0,8	-0,8	-1	-0,8		-1	-0,8	0,5	0,5	0,8
Б	Б.1	-0,2	0,5	0,5		-0,2	-0,8	-0,5	0,2	-0,2		0,5	0,2	-0,5	-1	-1
	Б.2	0,2	0,2	0,5		0,2	0,5	0,8	0,2	0,5		0,5	0,2	-0,2	-0,8	-1
	Б.3	-0,5	-0,8	-0,2		-0,2	-0,2	-0,2	-0,8	-0,2		-0,8	-0,2	0,5	0,8	1
В	В.1	-1	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5	-0,8	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5	-0,8	-0,8	-1
	В.2	-0,5	0,5	0,8		0,5	0,5	0,2	0,5	0,8		0,5	0,2	0,2	-0,2	-0,8
	В.3	0,2	0,2	0,5		0,2	0,2	0,8	0,2	0,2		0,2	0,5	0,5	0,5	0,5
	В.4	-0,5	-0,8	-0,8		-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,5		-0,8	-0,5	-0,2	0,8	1
Г	Г.1	-0,8	-0,5	-0,8		-1	-0,8	-1	-0,2	-0,5		-0,5	-0,8	-0,5	-1	-1
	Г.2	0,8	1	0,5		0,5	0,5	0,5	0,8	0,5		0,8	0,2	-0,8	-1	-1
	Г.3	0,2	0	0,5		0,5	0,8	0,8	0,2	0,8		0,5	0,8	-0,5	-0,5	-0,8
	Г.4	-0,8	-1	-0,5		-0,8	-0,5	-0,2	-0,8	-0,5		-0,8	-0,2	1	0,8	0,5
	Г.5	-1	-1	-1		-0,8	-1	-0,8	-1	-1		-1	-1	-0,2	0,2	0,2
Д	Д.1	0,5	0,2	0,8		0,5	0,8	0,5	1	1		1	1	0,8	0,8	0,8
	Д.2	0,2	0,5	0,2		-0,2	-0,5	-0,2	-0,5	-0,8		-1	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
	Д.3	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1
	Д.4	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1
	Д.5	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1
Е	Е.1	-0,2	-0,2	0,2		-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2		1	0,5	-0,5	-0,8	-1
	Е.2	-0,8	-0,8	-0,8		-0,8	-0,8	-1	-0,8	-0,8		-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-1
	Е.3	-0,8	-0,8	-0,8		-0,8	-0,8	-1	-0,8	-0,8		-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-1
	Е.4	-0,2	0,2	-0,5		-0,5	-0,5	-0,2	-0,5	-0,8		-0,8	-0,5	-0,5	-0,2	-0,5
	Е.5	0,5	0,2	0,5		0,5	0,2	0,5	0,2	0,2		-1	-0,5	0,8	0,8	1
Ж	Ж.1	0,5	0,2	0,8		0,8	1	-0,8	0,8	0,5		1	0,8	-0,8	-1	-1
	Ж.2	0,8	0,5	1		0,8	0,2	1	0,5	1		0,2	0,5	-0,5	-0,5	-0,8
	Ж.3	-0,8	-0,8	-0,8		-0,5	-1	0,5	-0,5	-0,2		-0,5	-0,2	0,5	0,8	1
	Ж.4	-1	-1	-1		-1	-1	-0,5	-1	-0,8		-1	-0,8	0,5	0,8	0,8
З	З.1	0,8	0,8	0,8		0,8	0,8	0,2	0,8	0,5		1	0,8	0,5	0,5	0,2
	З.2	0,2	-0,2	-0,2		-0,2	0,2	0,5	-0,2	-0,2		-0,5	-0,2	0,2	0,2	0,2
	З.3	-0,8	-1	-0,8		-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8		-1	-0,8	-0,5	-0,2	-0,2
	З.4	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-0,8	-0,5	-0,5

Використовуючи оцінки, отримані на першому етапі (табл. 7.26), а також оцінки заповнених матриць зв'язків, в результаті проведення розрахункової процедури МММА були отримані результати аналізу наслідків, занесені в підсумкову табл. 7.29.

Таблиця 7.29 – Наслідки небажаних подій з урахуванням можливості появи будь-якої небажаної події

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Труби	Дюкер
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,018	0,051
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,021	0,417
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,544	0,530
	А.4 Пошкодження невідомні	0,416	0,001
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,000	0,269
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,019	0,656
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,981	0,075
В) Можливість передачі функцій іншим об'єктам	В.1 Функції об'єкта можуть бути передані без обмежень	0,005	0,025
	В.2 Функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями	0,100	0,561
	В.3 Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями	0,322	0,401
	В.4 Функції об'єкта не можуть бути передані	0,574	0,014
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,000	0,004
	Г.2 До 7 діб	0,009	0,455
	Г.3 До 1 місяця	0,174	0,524
	Г.4 До 0,5 року	0,570	0,017
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,246	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	0,966	0,992
	Д.2 До 10 осіб	0,034	0,008
	Д.3 10–50 осіб	0,000	0,000
	Д.4 50–200 осіб	0,000	0,000
	Д.5 Більше 200 осіб	0,000	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,000	0,811
	Е.2 До 10 осіб	0,000	0,006
	Е.3 10–100 осіб	0,021	0,006
	Е.4 100–1000 осіб	0,427	0,038
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,551	0,140
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,001	0,464
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,259	0,512
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,431	0,024
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,309	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,000	0,894
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,142	0,105
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території	0,500	0,001
	З.4 Екологічна катастрофа	0,357	0,000

З табл. 7.29 можна зробити ряд порівняльних висновків:

- у цілому тунельний дюкер значно краще протистоїть можливим пошкодженням в результаті впливу всіх небажаних подій. В параметрі А (Цілісність об'єкта/його елементів) для обох об'єктів найбільш імовірною альтернативою є А.3 – «Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності» (вага 0,544 для трубного, 0,530 для тунельного дюкера), однак при цьому другою найбільш вагомою альтернативою для труб є А.4 – «Пошкодження невідновні» (вага 0,416), в той час як для дюкера це альтернатива А.2 – «Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності» (вага 0,417), при цьому вага альтернативи А.4 – «Пошкодження невідновні» близька до нуля. Ще більш демонстративна ситуація з параметром Б (Здатність до функціонування) – для труб вага альтернативи Б.3 – «Об'єкт припиняє функціонування» становить 0,981, що свідчить про дуже низьку стійкість до пошкоджень у разі настання небажаних подій. Для порівняння вага цієї ж альтернативи у тунельного дюкера складає лише 0,075, тобто повністю припинити його функціонування вкрай важко;
- для параметра В (Можливість передачі функцій іншим об'єктам) варто зазначити, що в розглянутому концепті тунельного дюкера передбачається не демонтувати систему трубного дюкера, а залишити її як резервну, тому тунель отримав оцінки альтернатив В.2 – «Функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями» зі значенням 0,561 і В.3 – «Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями» зі значенням 0,401. Для трубного дюкера найбільші оцінки цього параметра у альтернатив В.4 – «Функції об'єкта не можуть бути передані» зі значенням 0,574 і В.3 – «Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями» зі значенням 0,322;
- параметр Г (Час відновлення функціонування) також показує суттєву перевагу тунельного дюкера. Для труб найбільш вагомі альтернативи Г.4 – «До 0,5 року» (вага 0,507) і Г.5 – «Об'єкт не може бути

відновлений протягом 1 року» (вага 0,246). Для дюкера результат набагато кращий, його найбільш вагомі альтернативи Г.3 – «До 1 місяця» (0,524) і Г.2 – «До 7 діб» (0,455).

- подібні результати спостерігаються й для параметру Ж (Розмір матеріальних збитків) – для труб ранжування наступне: Ж.3 – «1000–10000 МЗП» (вага 0,431), Ж.4 – «більше 10000 МЗП» (вага 0,309), Ж.2 – «100–1000 МЗП» (вага 0,259), тоді як для тунельного дюкера: Ж.2 – «100–1000 МЗП» (вага 0,512), Ж.1 – «До 100 МЗП» (вага 0,464), тобто в цілому відновлення трубного дюкера потребуватиме приблизно в 10 разів менше ресурсів, що пов'язано з високою конструктивною стійкістю підземної споруди;
- параметр Д (Кількість постраждалих) не є значущим через природу об'єктів, які розглядаються. Безпосередньо постраждалих осіб, ймовірніше за все, не буде в обох випадках (процес транспортування стічних вод – безлюдний). Важливість цього параметра буде проявлятися в дослідженнях інших типів урбаністичних об'єктів;
- результати оцінювання для параметра Е (Порушені умови життєдіяльності) ще раз підтверджує оцінки, отримані для попередніх параметрів – оскільки для труб, ймовірніше за все, функціонування в разі небажаної події буде перервано, відповідно, будуть порушені умови життєдіяльності великої кількості осіб (Е.5 – «Більше 1000 осіб» з вагою 0,551). Для тунельного дюкера найбільш вагомою є альтернатива Е.1 – «Немає» з вагою 0,811. Варто зазначити, що проміжні альтернативи Е.2 – «До 10 осіб», Е.3 – «10–100 осіб» в обох випадках отримали низькі ваги через природу об'єктів, що розглядаються, оскільки внаслідок виходу з ладу каналізаційної системи кількість осіб, умови життєдіяльності яких порушені, одразу сягають дуже високих значень, що підкреслює критичний (особливо важливий) характер цього елемента інфраструктури міста;

- параметр З (Екологічні наслідки) найбільш наочно демонструє перевагу тунельного дюкера, оскільки для екологічних наслідків небажаних подій значення майже нульові (альтернатива З.1 – «Немає» з вагою 0,894), тоді як для труб в разі небажаних подій виникає З.3 – «Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території» (вага 0,500), або З.4 – «Екологічна катастрофа» (вага 0,357), тобто потенційні екологічні ризики набагато суворіші.

Таким чином, тунельний дюкер переважає майже за всіма розглянутими критеріями трубні дюкери, причому за кількома важливими критеріями – радикально.

7.5.1 Сценарний аналіз використання підземного простору м. Києва при військових (диверсійних) загрозах, техногенних і природних надзвичайних ситуаціях

Модифікований метод морфологічного аналізу дозволяє проводити прогнозний аналіз «що-якби», обираючи замість всієї можливої множини об'єктів першого етапу дослідження конкретну конфігурацію, або групу конфігурацій, що містять конкретну альтернативу загроз. Ймовірність таких фіксованих альтернатив приймається рівною 1, а ймовірність всіх інших альтернатив того ж параметра – рівною 0. Відповідно, результати другого аналізу відображають можливі наслідки в рамках конкретного сценарію, заданого морфологічною таблицею першого етапу. Таким чином можна промодельовувати різні сценарії, порівняти їх між собою, і простежити, наскільки сильно вони відрізняються від загальної картини, коли розглядаються всі можливі варіанти небажаних подій.

В цьому дослідженні взято три сценарії небажаних подій з відповідними конфігураціями морфологічної таблиці першого етапу (трубні та тунельний дюкери):

Сценарій 1 (військово-диверсійна загроза): 1.1 – вибух, 2.1 – умисний, 3.2 – масштаб: декілька ділянок;

Сценарій 2 (техногенна загроза): 1.5 – експлуатаційні пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту, 2.3 – технічне, технологічне, 3.2 – масштаб: декілька ділянок;

Сценарій 3 (природна загроза): 1.3 – зсуви, провали та просідання ґрунту, 2.3 – технічне, технологічне, 3.3 – об'єкт повністю.

Також розглянуто сценарій 4 – диверсія невизначеного типу, тобто зафіксовано тільки походження події – 2.1, «Антропогенне зі злим умислом», що глибше розкриває сценарії використання підземного простору Києва при військових (диверсійних) загрозах.

Результати моделювання представлені для сценарію 1 представлені в табл. 7.30.

Таблиця 7.30 – Сценарій 1: 1.1 – вибух, 2.1 – умисний, 3.2 – масштаб: декілька ділянок

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Труби	Дюкер
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,000	0,009
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,000	0,247
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,828	0,742
	А.4 Пошкодження невідомні	0,172	0,001
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,000	0,142
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,004	0,764
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,996	0,094
В) Можливість передачі функцій іншим об'єктам	В.1 Функції об'єкта можуть бути передані без обмежень	0,000	0,000
	В.2 Функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями	0,000	0,176
	В.3 Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями	0,403	0,793
	В.4 Функції об'єкта не можуть бути передані	0,597	0,031
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,000	0,000
	Г.2 До 7 діб	0,006	0,447
	Г.3 До 1 місяця	0,392	0,536
	Г.4 До 0,5 року	0,471	0,018
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,131	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	1,000	0,959
	Д.2 До 10 осіб	0,000	0,041
	Д.3 10–50 осіб	0,000	0,000
	Д.4 50–200 осіб	0,000	0,000
	Д.5 Більше 200 осіб	0,000	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,000	0,399
	Е.2 До 10 осіб	0,000	0,000
	Е.3 10–100 осіб	0,052	0,000
	Е.4 100–1000 осіб	0,424	0,133
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,524	0,468
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,000	0,087
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,239	0,874
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,539	0,039
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,222	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,000	0,729
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,009	0,270
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території;	0,470	0,001
	З.4 Екологічна катастрофа	0,522	0,000

Результати зручно порівнювати у вигляді графіків для окремих параметрів.

Результати сценарію 1 для параметрів Б, Е, Ж, З наведені на рис. 7.27–7.30.

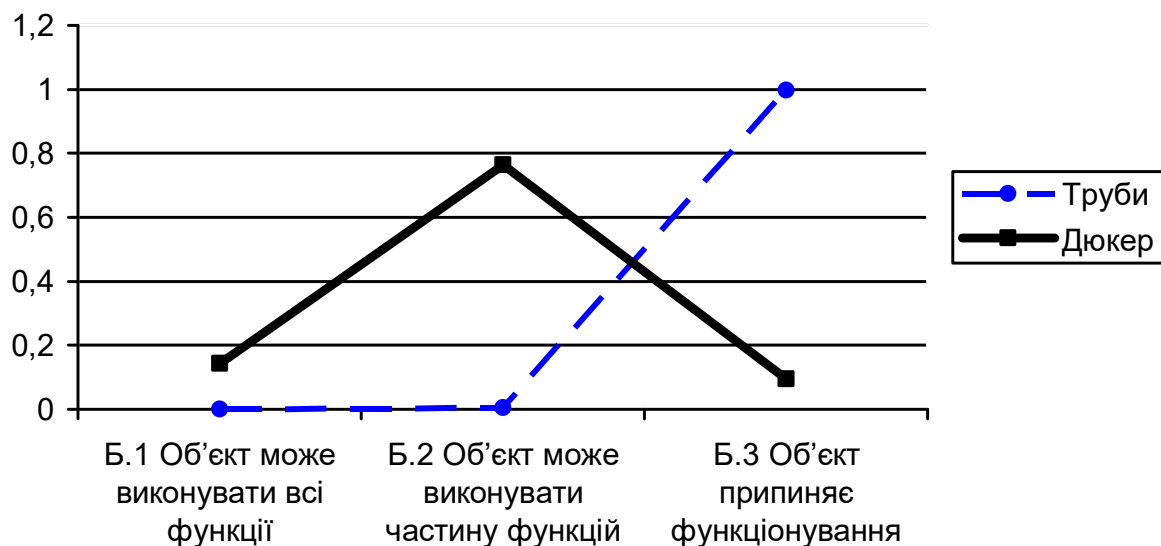


Рисунок 7.27 – Діаграма ваг альтернатив параметра Б – «Здатність до функціонування»

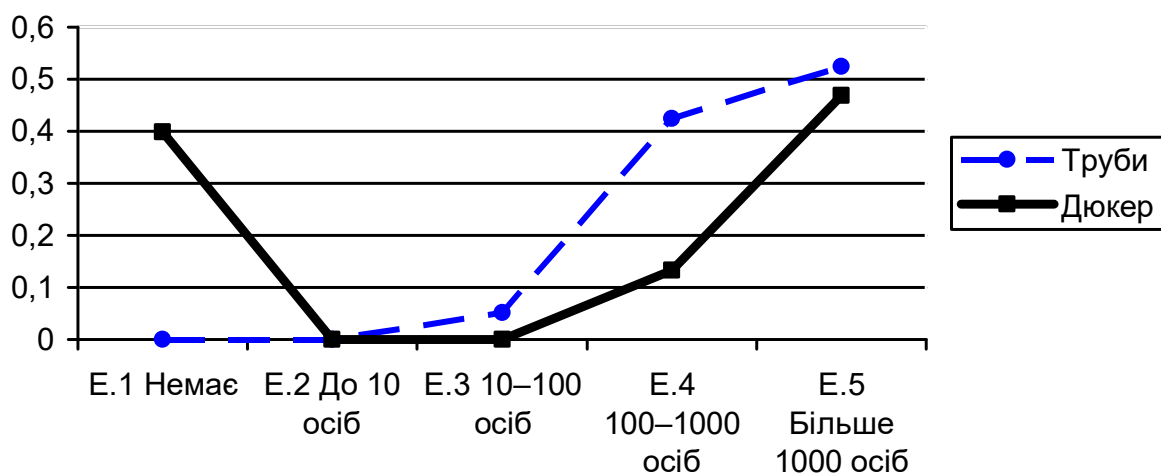


Рисунок 7.28 – Діаграма ваг альтернатив параметра Е – «Порушені умови життєдіяльності»

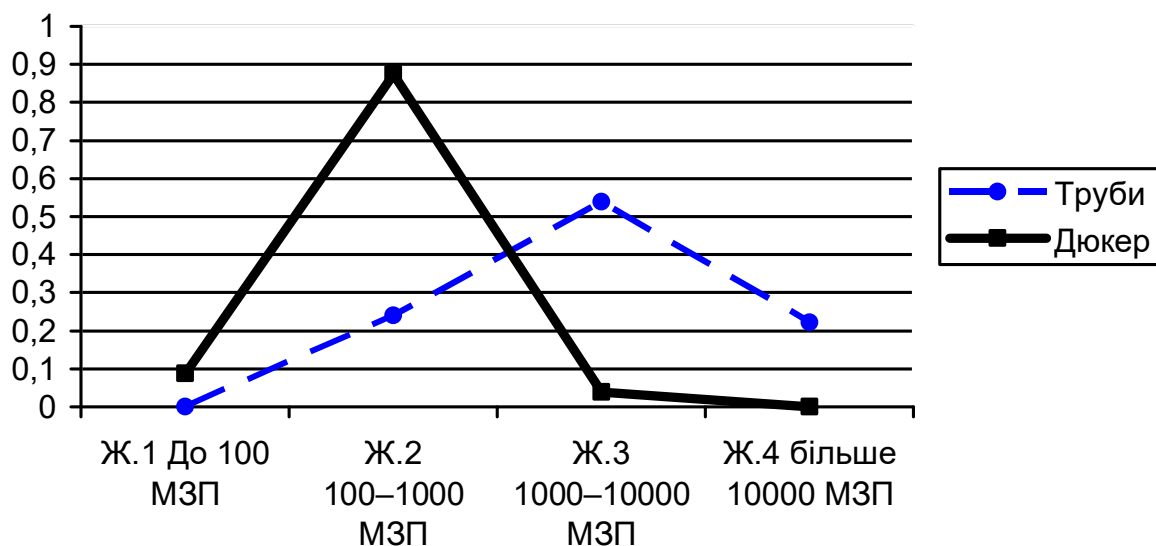


Рисунок 7.29 – Діаграма ваг альтернатив параметра Ж – «Розмір матеріальних збитків»

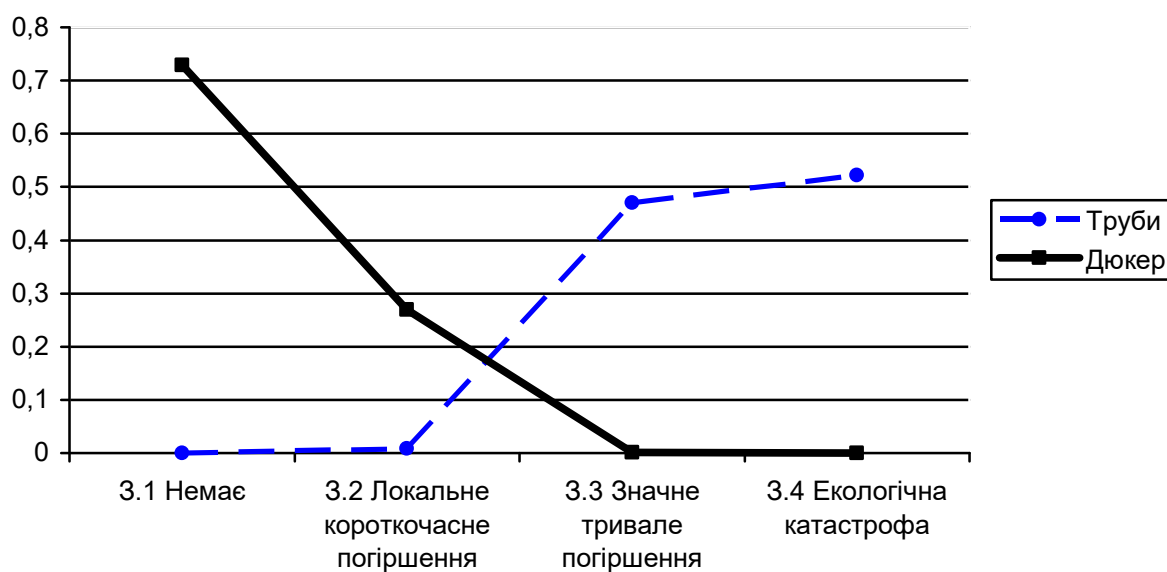


Рисунок 7.30 – Діаграма ваг альтернатив параметра З – «Екологічні наслідки»

Діаграми дозволяють наглядно співвіднести й оцінити ймовірності сценаріїв щодо обраної групи критеріїв для трубного та тунельного дюкерів. Примітно, що прояв найбільш вразливої диверсійної події (вибух) залишає для тунельного дюкера можливість виконувати всі функції (ймовірність – 0,142), тоді як для трубного дюкера ймовірність цього дорівнює нулю, так само і можливість виконувати навіть частину функцій (рис. 7.27). При цьому висока ймовірність часткового виконання функцій у разі вибуху (близько 0,8) зберігається тунельним

дюкером. Порушення умов життєдіяльності населення – єдиний критерій, де показники обох дюкерів не мають радикальних відмінностей, оскільки в разі припинення функціонування будь-якого дюкера погіршаться умови для великої частини населення Києва (рис. 7.28). Майже весь діапазон матеріальних збитків припадає для тунельного дюкера на відносно невеликі витрати до 1 тис. МЗП на ремонт окремої ділянки пошкодженого вибухом кріплення (оправи), гідроізоляції тощо (імовірність 0,87), тоді як для трубного дюкера вибух є повним руйнуванням, а витрати на відновлення ті ліквідацію екологічних наслідків складають до 10 тис. МЗП і більше з сумарною імовірністю 0,76 (рис. 7.29). Особливо значимою є діаграма параметра Екологічні наслідки. Прорив каналізаційних стоків у Дніпро може призвести до екологічної катастрофи всього річного басейну, а зупинка функціонування каналізації для багатомільйонного міста є неприпустимою. Як наглядно демонструють графіки, вибух у тунельному дюкері не вплине на екологічну ситуацію (імовірність 0,73), оскільки він знаходиться на десятки метрів нижче річного дна й пошкодження оправи тунелю не вплине на ситуацію. Локальне короткочасне погіршення (імовірність 0,27) може бути пов'язане з випадком потрапляння на підземні води, але воно не має загрозливого характеру. З іншого боку – підривання трубних дюкерів створює екологічну катастрофу (імовірність 0,52), або значне тривале погіршення екологічної ситуації (імовірність 0,47) (рис. 7.30).

Проведений аналіз свідчить, що система трубних дюкерів є вразливим об'єктом інфраструктури, яка може стати ціллю диверсійної або терористичної атаки з катастрофічними для життєдіяльності міста та екологічної ситуації наслідками. Одночасно, отримані результати доводять високу надійність тунельного дюкера щодо стабільності в умовах військовий (диверсійних) загроз, показують доцільність переведення розглянутої ділянки міської інфраструктури в підземний простір. Результати морфологічного моделювання з фіксованим параметром, що відповідають сценаріям 2–4, представлені в табл. 7.31 і на відповідних діаграмах (рис. 7.31–7.34).

Таблиця 7.31 – Результати оцінювання для сценаріїв 2–4

Параметр	Альтернатива	Сценарій 2		Сценарій 3		Сценарій 4	
		Труби	Дюкер	Труби	Дюкер	Труби	Дюкер
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або мінімальні	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,024
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,216	0,383	0,000	0,000	0,000	0,328
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,649	0,613	0,832	1,000	0,505	0,647
	А.4 Пошкодження невідновні	0,135	0,001	0,168	0,000	0,495	0,000
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,000	0,223	0,000	0,179	0,000	0,152
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,229	0,628	0,000	0,536	0,001	0,792
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,771	0,149	1,000	0,286	0,999	0,056
В) Можливість передачі функцій іншим об'єктам	В.1 Функції об'єкта можуть бути передані без обмежень	0,016	0,022	0,005	0,007	0,000	0,003
	В.2 Функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями	0,285	0,573	0,181	0,579	0,012	0,294
	В.3 Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями	0,357	0,382	0,380	0,402	0,274	0,685
	В.4 Функції об'єкта не можуть бути передані	0,342	0,022	0,434	0,012	0,714	0,018
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000
	Г.2 До 7 діб	0,044	0,353	0,004	0,191	0,002	0,516
	Г.3 До 1 місяця	0,312	0,636	0,179	0,574	0,143	0,474
	Г.4 До 0,5 року	0,599	0,010	0,782	0,213	0,469	0,010
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,044	0,000	0,036	0,000	0,386	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	1,000	0,995	0,973	0,993	0,942	0,985
	Д.2 До 10 осіб	0,000	0,005	0,027	0,007	0,058	0,015
	Д.3 10–50 осіб	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Д.4 50–200 осіб	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Д.5 Більше 200 осіб	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,000	0,599	0,000	0,179	0,000	0,712
	Е.2 До 10 осіб	0,001	0,003	0,000	0,002	0,000	0,000
	Е.3 10–100 осіб	0,055	0,003	0,023	0,002	0,013	0,000
	Е.4 100–1000 осіб	0,447	0,021	0,459	0,012	0,407	0,100
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,497	0,374	0,518	0,805	0,580	0,188
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,000	0,459	0,000	0,194	0,000	0,108
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,534	0,510	0,483	0,719	0,111	0,844
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,427	0,030	0,427	0,086	0,410	0,047
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,040	0,000	0,090	0,000	0,479	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,000	0,903	0,000	0,837	0,000	0,805
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,229	0,095	0,203	0,159	0,011	0,194
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території;	0,550	0,001	0,600	0,004	0,470	0,001
	З.4 Екологічна катастрофа	0,220	0,000	0,197	0,000	0,519	0,000

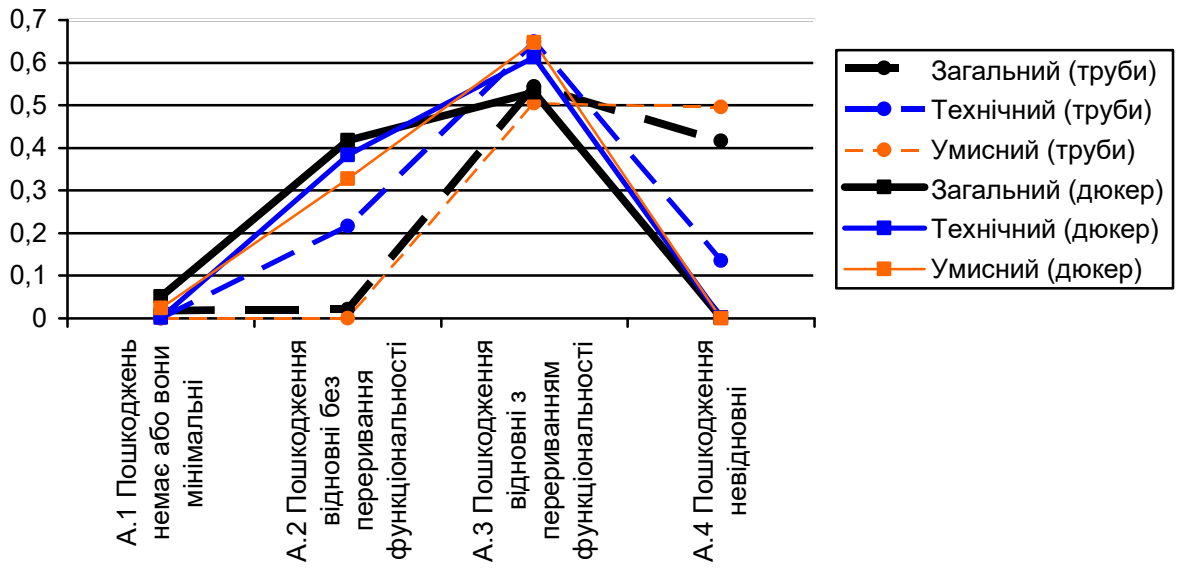


Рисунок 7.31 – Діаграма ваг альтернатив параметра А – «Цілісність об’єкта/його елементів»

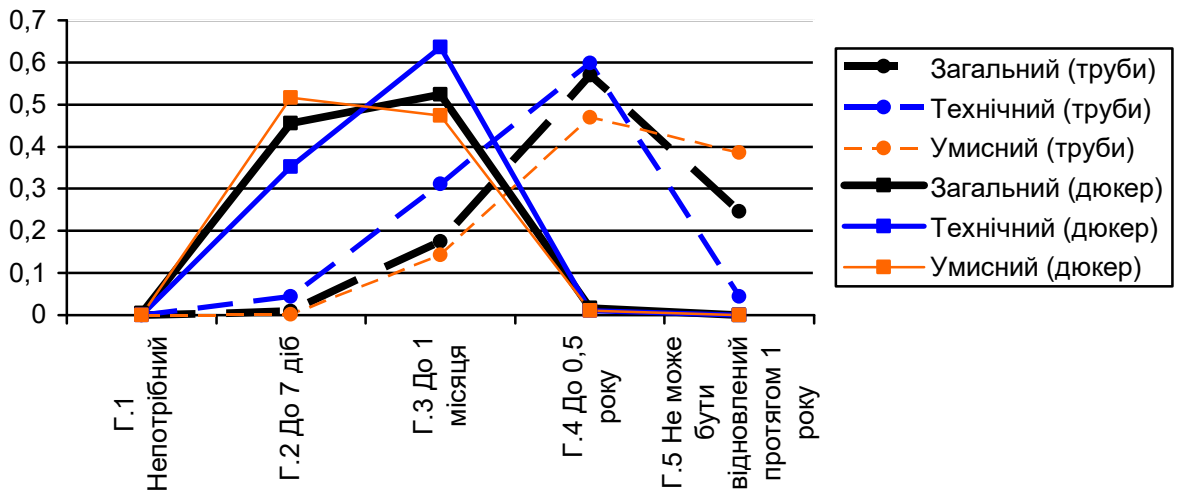


Рисунок 7.32 – Діаграма ваг альтернатив параметра Г – «Час відновлення функціонування»

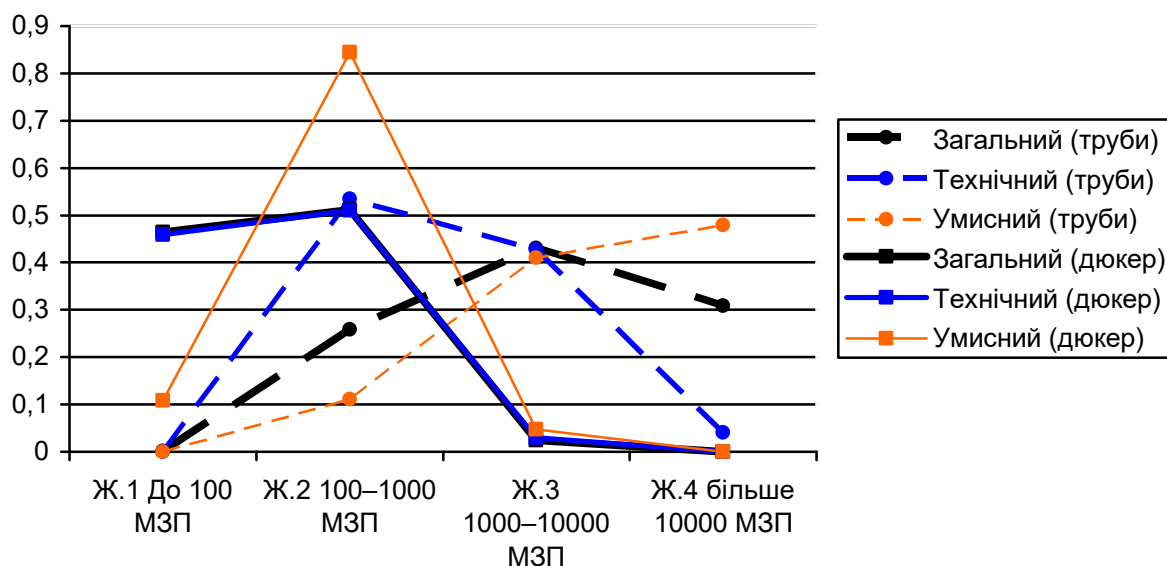


Рисунок 7.33 – Діаграма ваг альтернатив параметра Ж – «Розмір матеріальних збитків»

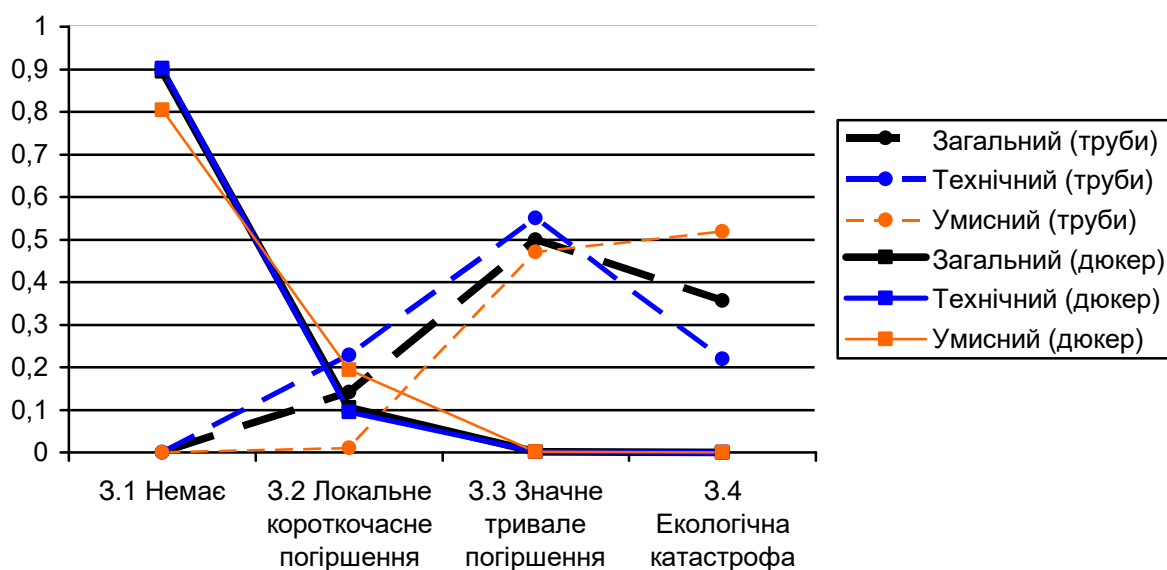


Рисунок 7.34 – Діаграма ваг альтернатив параметра З – «Екологічні наслідки»

Графіки на рис. 7.31–7.34 ще раз наочно демонструють перевагу дюкера, відображену результатами моделювання, причому ця перевага спостерігається в будь-яких сценаріях. В порівнянні сценаріїв можна відмітити, що умисно створені небажані події (диверсії, терористичні акти) в цілому можуть викликати більш суворі наслідки і завдати більших збитків, ніж природні та техногенні небажані події. Отримана методика та інструментарій модифікованого морфологічного

аналізу можуть бути застосовані для порівняння будь-яких інших об'єктів інфраструктури й закладають основи системної стратегії розвитку міського підземного простору з метою мінімізації військових, техногенних і природних загроз.

7.5.2 Обґрунтування системного концепту тунельного переходу

Побудована в підрозділі 6.5 морфологічна модель небажаних подій і їх наслідків була також застосована для обґрунтування переваг концепту тунельного переходу р. Дніпро порівняно з мостовими переходами.

Вхідні оцінки морфологічної таблиці першого етапу МММА (параметри і альтернативи небажаних подій), а також результат їх перерахунку на основі матриці взаємозв'язків наведені в табл. 7.32. В цій задачі альтернатива «1.6 Порухнення функціонування без конструктивних пошкоджень» була вилучена з розгляду, оскільки для мостових або тунельних переходів річки вона не має сенсу.

Таблиця 7.32 – Вхідні оцінки і результат розрахунку МММА для параметрів і альтернатив небажаних подій

Параметр	Альтернатива	Вхідні нормовані оцінки		Після врахування взаємозв'язків	
		Міст	Тунель	Міст	Тунель
1. Тип небажаної події	1.1 Вибух	0,8	0,65	0,272	0,215
	1.2 Пожежа	0,65	0,5	0,197	0,164
	1.3 Зсуви, провали та просідання ґрунту	0,35	0,65	0,061	0,230
	1.4 Погодні катаклізми	0,8	0,05	0,111	0,006
	1.5 Пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту	0,8	0,65	0,360	0,385
2. Походження небажаної події	2.1 Антропогенне зі злим умислом	0,8	0,65	0,382	0,331
	2.2 Антропогенне без злого умислу	0,8	0,5	0,221	0,031
	2.3 Технічне, технологічне	0,65	0,65	0,179	0,475
	2.4 Природне	0,65	0,05	0,218	0,162
3. Масштаб впливу небажаної події	3.1 Окремий елемент об'єкта, або окрема обмежена ділянка	0,95	0,8	0,522	0,668
	3.2 Декілька елементів об'єкта, або декілька ділянок	0,8	0,5	0,271	0,265
	3.3 Об'єкт повністю	0,65	0,2	0,144	0,062
	3.4 Об'єкт і сусідні до нього	0,5	0,05	0,034	0,003
	3.5 Район міста і більше	0,5	0,05	0,028	0,002

На основі експертного опитування були заповнені матриці зв'язків першого і другого етапів МММА, які пов'язують параметри небажаних подій і їх наслідків. Параметр «В. Можливість передачі функцій іншим об'єктам» для цієї задачі не

розглядався, оскільки поруч немає інших переходів, тому його єдиною альтернативою є «Неможливо» незалежно від конфігурації небажаної події. Результат розрахунку ваг наслідків небажаних подій при можливості виникнення будь-якої конфігурації небажаної події наведено в табл. 7.33.

Таблиця 7.33 – Ваги наслідків небажаних подій при можливості виникнення будь-якої конфігурації небажаної події

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Міст	Тунель
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,001	0,003
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,083	0,087
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,915	0,910
	А.4 Пошкодження невідновні	0,001	0,000
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,005	0,024
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,252	0,395
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,743	0,581
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,011	0,013
	Г.2 До 7 діб	0,476	0,687
	Г.3 До 1 місяця	0,481	0,296
	Г.4 До 0,5 року	0,031	0,003
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,001	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	0,099	0,205
	Д.2 До 10 осіб	0,631	0,651
	Д.3 10–50 осіб	0,244	0,135
	Д.4 50–200 осіб	0,026	0,008
	Д.5 Більше 200 осіб	0,001	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,160	0,175
	Е.2 До 10 осіб	0,007	0,003
	Е.3 10–100 осіб	0,018	0,003
	Е.4 100–1000 осіб	0,353	0,359
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,462	0,459
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,022	0,260
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,298	0,643
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,600	0,096
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,080	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,220	0,727
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,780	0,273
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території	0,000	0,000
	З.4 Екологічна катастрофа	0,000	0,000

Також розглядалася задача МММА з фіксованим параметром для дослідження більш конкретних сценаріїв небажаних подій. Були обрані два сценарії:

Сценарій 1 – зафіксована альтернатива «1.1 Вибух»;

Сценарій 2 – зафіксована альтернатива «1.4 Погодні катаклізми».

Результати розрахунку ваг наслідків небажаних подій наведені в табл. 7.34 для сценарію 1; в табл. 7.35 для сценарію 2.

Таблиця 7.34 – Ваги наслідків небажаних подій при зафіксованій альтернативі «1.1 Вибух»

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Міст	Тунель
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,000	0,003
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,026	0,052
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,972	0,945
	А.4 Пошкодження невідновні	0,002	0,000
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,000	0,008
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,161	0,273
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,839	0,719
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,000	0,004
	Г.2 До 7 діб	0,443	0,674
	Г.3 До 1 місяця	0,502	0,316
	Г.4 До 0,5 року	0,054	0,006
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,001	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	0,000	0,000
	Д.2 До 10 осіб	0,574	0,655
	Д.3 10–50 осіб	0,367	0,313
	Д.4 50–200 осіб	0,056	0,032
	Д.5 Більше 200 осіб	0,002	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,000	0,064
	Е.2 До 10 осіб	0,011	0,006
	Е.3 10–100 осіб	0,026	0,006
	Е.4 100–1000 осіб	0,384	0,355
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,579	0,568
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,019	0,205
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,163	0,685
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,677	0,110
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,142	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,199	0,679
	З.2 Незначне, локальне, короточасне погіршення екологічної ситуації	0,801	0,321
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території	0,000	0,000
	З.4 Екологічна катастрофа	0,000	0,000

Таблиця 7.35 – Ваги наслідків небажаних подій при зафіксованій альтернативі «1.4 Погодні катаклізми»

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Міст	Тунель
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,004	0,107
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,047	0,232
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,949	0,661
	А.4 Пошкодження невідновні	0,000	0,000
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,011	0,274
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,333	0,695
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,656	0,030
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,013	0,099
	Г.2 До 7 діб	0,601	0,647
	Г.3 До 1 місяця	0,375	0,254
	Г.4 До 0,5 року	0,011	0,000
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,000	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	0,070	0,593
	Д.2 До 10 осіб	0,649	0,399
	Д.3 10–50 осіб	0,265	0,008
	Д.4 50–200 осіб	0,015	0,000
	Д.5 Більше 200 осіб	0,000	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,197	0,924
	Е.2 До 10 осіб	0,006	0,000
	Е.3 10–100 осіб	0,006	0,000
	Е.4 100–1000 осіб	0,338	0,032
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,453	0,044
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,014	0,433
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,286	0,567
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,657	0,000
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,043	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,082	0,641
	З.2 Незначне, локальне, короточасне погіршення екологічної ситуації	0,918	0,359
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території	0,000	0,000
	З.4 Екологічна катастрофа	0,000	0,000

Результати можуть бути більш наглядно представлені у формі діаграм (рис. 7.35–7.41). На графіках лінія «Загальний» відповідає можливості виникнення будь-якої конфігурації небажаної події.

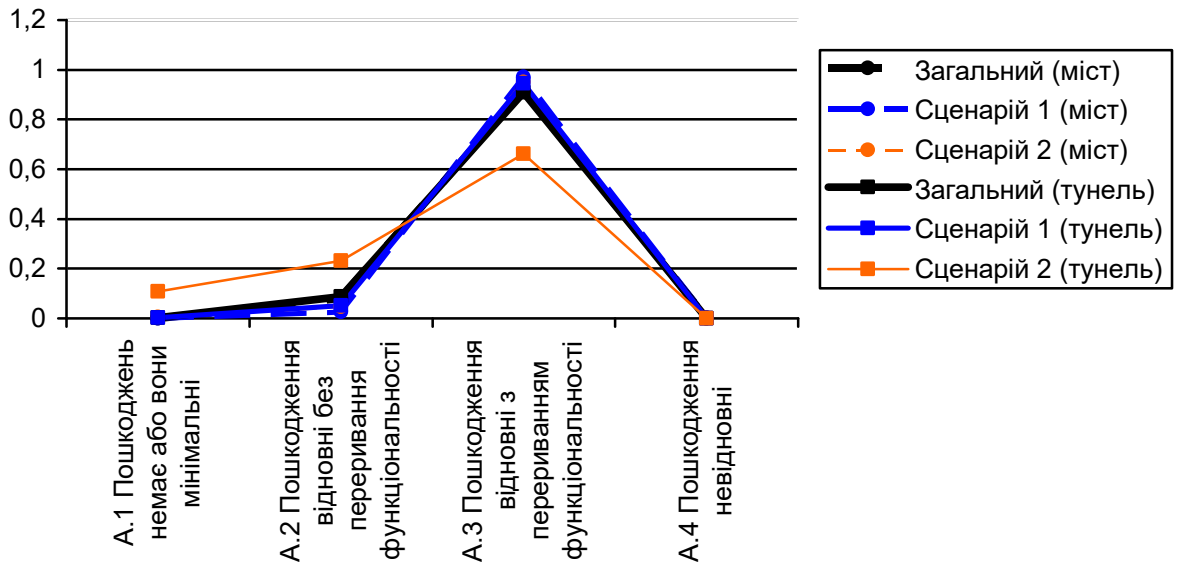


Рисунок 7.35 – Діаграма ваг альтернатив параметра А – «Цілісність об’єкта/його елементів»

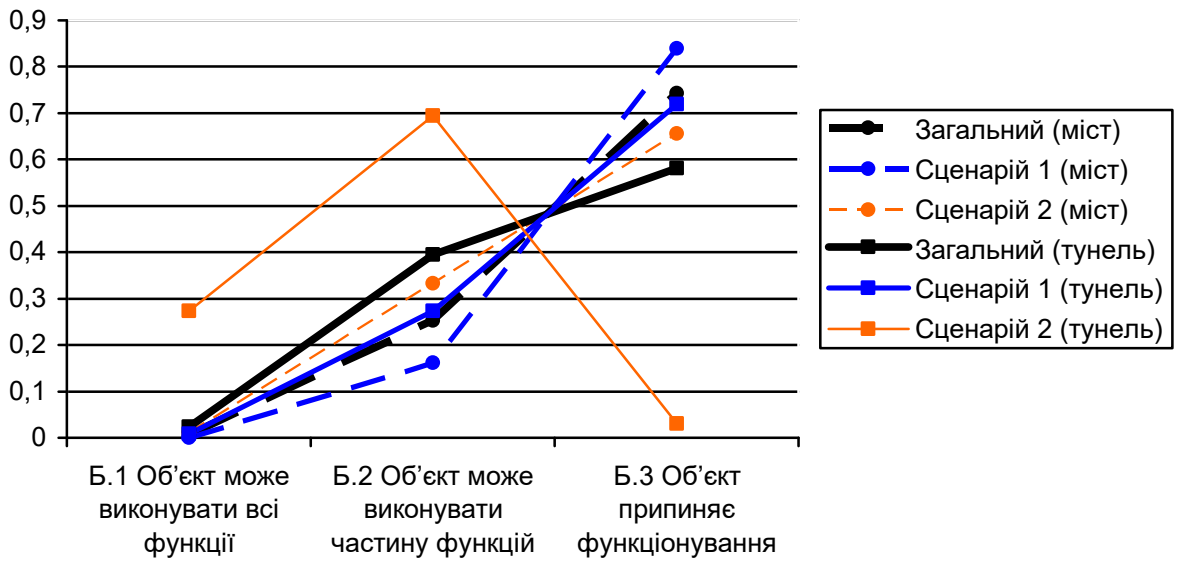


Рисунок 7.36 – Діаграма ваг альтернатив параметра Б – «Здатність до функціонування»

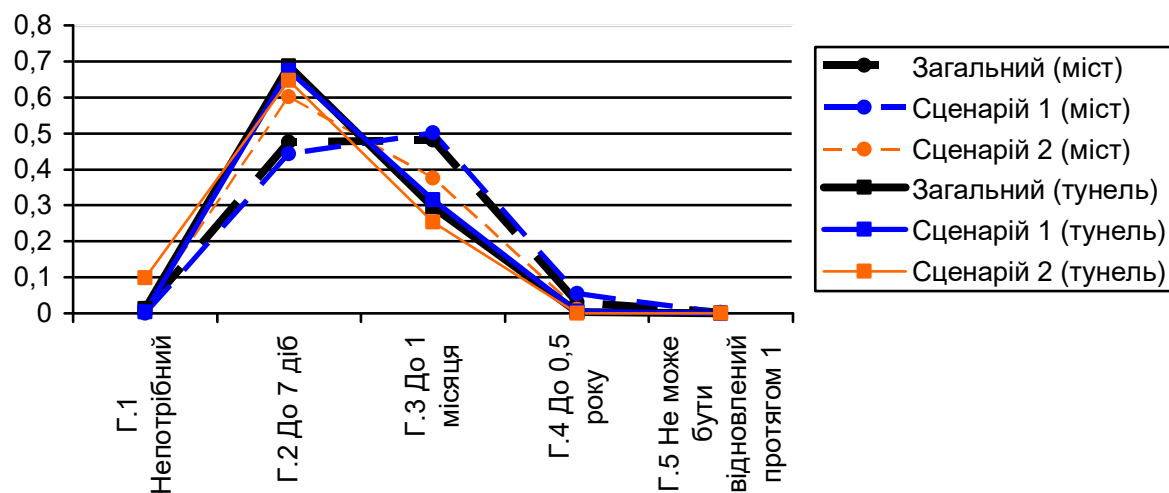


Рисунок 7.37 – Діаграма ваг альтернатив параметра Г – «Час відновлення функціонування»

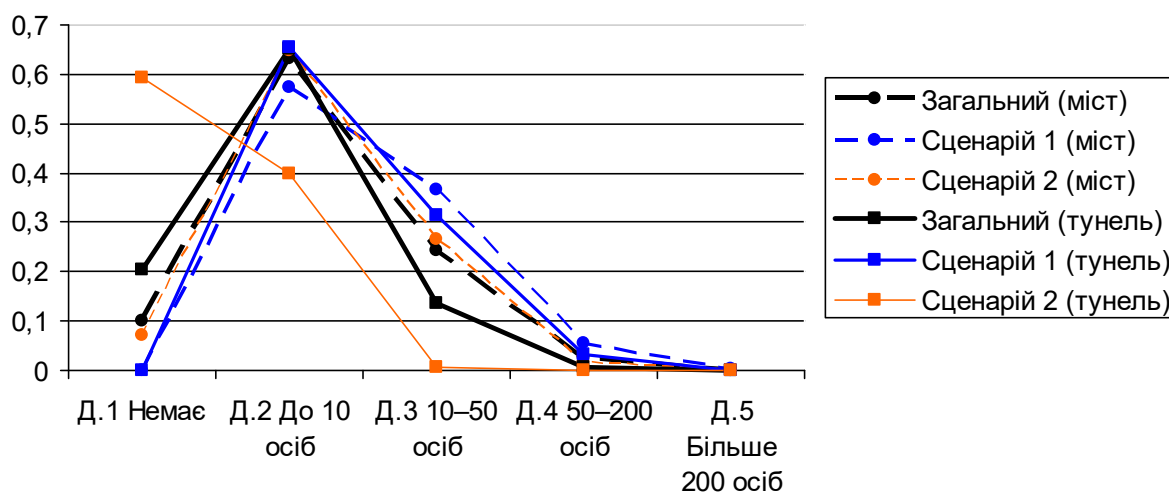


Рисунок 7.38 – Діаграма ваг альтернатив параметра Д – «Кількість постраждалих»

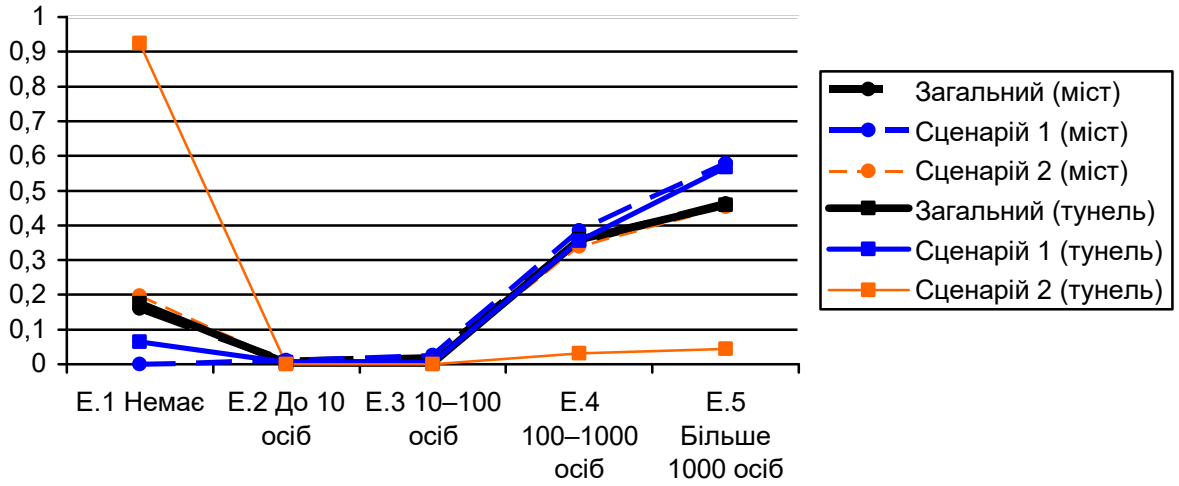


Рисунок 7.39 – Діаграма ваг альтернатив параметра Е – «Порушені умови життєдіяльності»

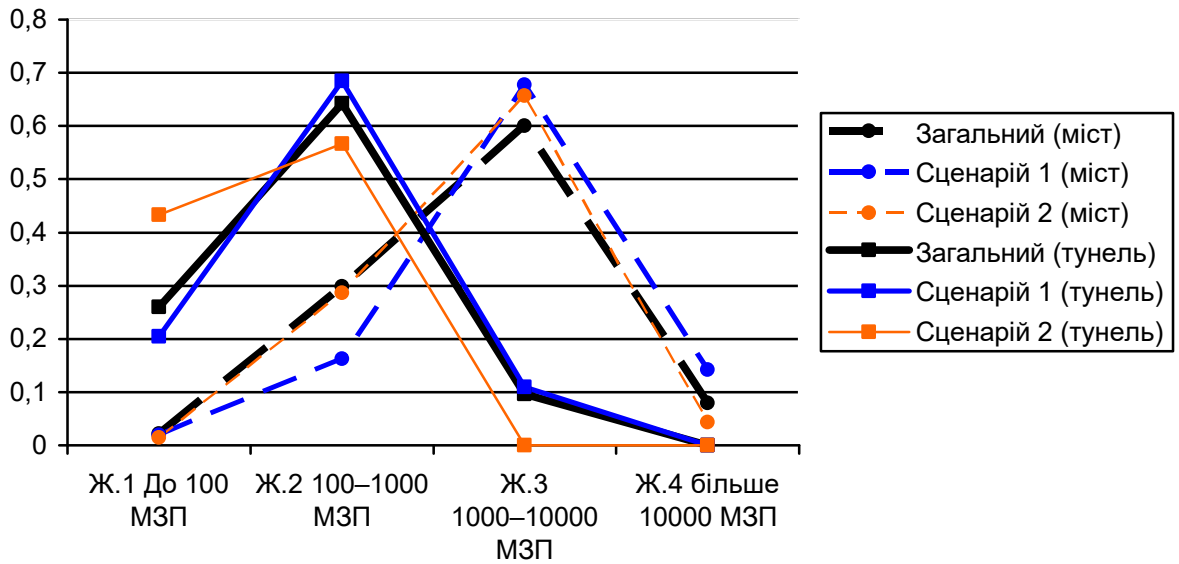


Рисунок 7.40 – Діаграма ваг альтернатив параметра Ж – «Розмір матеріальних збитків»

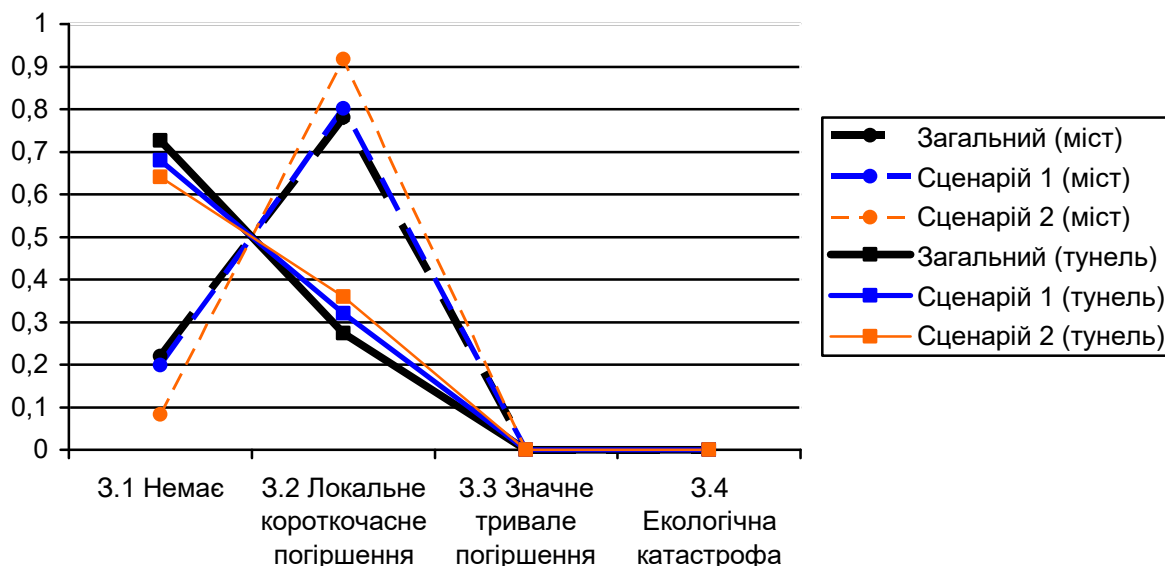


Рисунок 7.41 – Діаграма ваг альтернатив параметра З – «Екологічні наслідки»

Як і в попередній задачі, діаграми побудовані таким чином, що зміщення площі під графіком ліворуч означає більшу сприятливість відповідного об'єкта або сценарію.

З діаграм можна зробити ряд висновків:

– з точки зору стійкості до припинення функціонування (параметри А – «Цілісність об'єкта/його елементів», Б – «Здатність до функціонування») тунельний перехід має незначну перевагу над мостовим переходом, однак сильно виділяється сценарій погодних катаклізмів, при яких тунельний перехід демонструє набагато кращі показники для цих параметрів (рис. 7.35, 7.36);

– з точки зору відновлення функціонування в разі настання небажаних подій тунельний перехід має перевагу над мостовим переходом, що видно із параметра Г – «Час відновлення функціонування» (рис. 7.37), і особливо параметра Ж – «Розмір матеріальних збитків» (рис. 7.40), в якому для тунельного переходу альтернатива Ж.2 – «100–1000 МЗП» має однозначну перевагу над іншими, тоді як для мосту така ж однозначна перевага спостерігається для альтернативи Ж.3 – «1000–10000 МЗП», тобто як в середньому, так і в розглянутих сценаріях небажаних подій збитки від аварій і катастроф для мостів будуть приблизно в 10 раз вищі, ніж для тунелів;

– кількість постраждалих в разі настання небажаних подій (параметр Д – «Кількість постраждалих», рис. 7.38) для обох типів об'єктів приблизно однакова, з невеликою перевагою тунелів. На цей показник більший вплив здійснює вибір розглядуваного сценарію, оскільки при вибуху кількість постраждалих суттєво збільшується порівняно з загальним сценарієм або сценарієм погодних катаклізмів;

– аналіз параметру Е – «Порушені умови життєдіяльності» (рис. 7.39) практично співпадає з результатами для параметру Б – «Здатність до функціонування», оскільки умови життєдіяльності порушуються в разі часткового або повного припинення функціонування переходу, тому тут перевага тунелю незначна, крім сценарію погодного катаклізму, де тунельний перехід також демонструє абсолютну перевагу;

– для параметра З – «Екологічні наслідки» (рис. 7.41) ненульові ваги спостерігаються тільки для альтернатив «З.1 Немає» і «З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації», оскільки обидва типи переходів не здатні спричинити серйозний негативний вплив на екологічну ситуацію. Однак тут перевага тунелю також однозначна.

Таким чином, концепт тунельного переходу вочевидь є більш доцільним з точки зору екологічних наслідків, реалізації небажаних подій терористичного, техногенного чи природного характеру, а також технічної надійності та довговічності.

Висновки за розділом 7

1. Модель порівняння ділянок підземного будівництва на основі інженерно-геологічних факторів випробувана на 4 реальних ділянках м. Києва. Проаналізовано перспективи будівництва на кожній із ділянок з урахуванням отриманих результатів. Проведений аналіз упередженості моделі і процедура виявлення протиріч у МВЗАП для підвищення довіри до результатів, а також перевірки адекватності і корисності цих інструментів.

2. Модель оцінювання пріоритетності будівництва паркінгів використана для 2 реальних ділянок м. Києва. Сформульовано висновки щодо переваги однієї з ділянок над іншою.

3. Модель оцінювання впливів будівництва автомобільних тунелів на фактори ризику використана для аналізу тунелів, будівництво яких передбачене Генеральним планом м. Києва. Задача розглядалась з використанням більш простої моделі для порівняння двох тунелів, і з використанням розширеної моделі, що враховує також безпекові фактори, для всіх 8 тунелів. На основі отриманих результатів обґрунтовано пріоритетність будівництва певних тунелів порівняно з іншими. Залучена комбінована модель на основі МММА і методу аналізу ієрархій, яка підтверджує результати, отримані з використанням МММА окремо, і також демонструє гнучкість використання при експертному підході до оцінювання критеріїв відповідно до пріоритетів ОПР.

4. Модель оцінювання структурно-функціональних факторів адаптовано до задачі порівняння двох альтернативних ділянок потенційного будівництва Одеського метрополітену, з точки зору їх впливу на ряд факторів – вирішення транспортних проблем, сприяння розвитку міста і туристично-рекреаційному потенціалу, забезпечення цивільного захисту, тощо. На основі цієї моделі отримані результати, що дозволяють порівняти альтернативні проєкти за їх впливом на різні сфери міського життя. Для цієї задачі також було проведено аналіз чутливості, який показав, що результати розв'язання є достатньо стійкими і слабо залежать від зміни окремих оцінок вхідних даних.

5. Морфологічна модель оцінювання впливу небажаних подій на урбаністичні об'єкти була застосована для порівняння системи каналізаційних труб, що проходять по дну р. Дніпро, і підземного дюкера, що використовується з тією ж метою. Результати аналізу показали суттєву перевагу підземного дюкера, що дозволяє рекомендувати його в якості пріоритетного проєкту. Також ця модель була використана для порівняння мостового і тунельного переходів р. Дніпро, також підтверджуючи перевагу підземного будівництва з точки зору

протидії несприятливим факторам. Для обох задач аналіз проводився як для множини несприятливих подій, так і для конкретних сценаріїв небажаних подій.

Матеріали розділу викладені в роботах [36, 37, 73, 74, 134, 136, 150, 151].

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження і одержані результати дозволяють зробити висновок, що вирішена проблема створення системної методології освоєння підземного простору мегаполісів з урахуванням невизначеностей, багатофакторних ризиків, в рамках якої:

1. Досліджено актуальність теми, проаналізовано поточний стан розвитку методів системного аналізу в задачах розвитку підземного простору міст, і на основі цього аналізу сформульовано системний підхід до побудови інструментарію на основі МММА для розв'язання задач освоєння підземного простору мегаполісів.

2. Розроблено ряд підходів, прийомів, алгоритмів, практичних процедур МММА для роботи з неточними, неповними, нечіткими, протирічними, недостовірними даними. Запропоновано прийоми, процедури, алгоритми визначення проявів впливу цих НЕ-факторів для задач, що розв'язуються за допомогою МММА, а також способи і модифікації методу, що дозволяють зменшувати наслідки цих невизначеностей, і отримувати адекватні результати навіть в умовах недосконалих вхідних даних, враховуючи їх природу.

На основі вдосконаленого математичного апарату МММА були створені процедури оцінювання чутливості моделі, тобто визначення допустимих змін вхідних даних, що не призводять до зміни результату. Таким чином створено механізм протидії неточності вхідних даних за рахунок перевірки можливості впливу похибки на результат, і визначення найбільш критичних елементів вхідних даних, на які слід звернути особливу увагу. Чутливість розглянута відносно різних елементів вхідних даних – попередніх оцінок альтернатив і значень матриць зв'язків. Процедура аналізу чутливості продемонстрована на модельному прикладі.

Розроблено прийоми використання МММА в умовах неповноти вхідних даних. Сформовано алгоритм дій у випадку пропусків оціночної вхідної інформації. Розглянуто питання повноти множини альтернатив параметрів,

запропоновано прийоми оцінювання доповнюючої альтернативи на основі різних міркувань, які можуть бути використані в залежності від конкретної задачі. Розроблено процедури оцінювання повноти множини альтернатив параметра МТ на основі аналізу ненормованих експертних оцінок для морфологічної моделі, які враховують типи параметрів.

Розроблено процедуру оцінювання протирічності вхідних даних у вигляді МВЗАП. Запропонована процедура використовує позитивні оцінки МВЗАП як мірило схожості альтернатив, що дозволяє визначити неузгодженості у трійках альтернатив, зв'язки між якими можуть бути задані невірно і мають бути переглянуті.

Розроблено нечітку модифікацію методу морфологічного аналізу, в якій на основі використання нечітких попередніх оцінок альтернатив розраховуються нечіткі оцінки з урахуванням взаємозв'язків між ними. Модифікація містить три етапи: визначення нормованих нечітких оцінок альтернатив; визначення нечітких оцінок конфігурацій на основі нормованих нечітких оцінок альтернатив; визначення нечітких оцінок альтернатив з урахуванням взаємозв'язків між параметрами на основі нечітких оцінок конфігурацій. Для кожного кроку обґрунтовані два підходи до визначення функції належності – інтегральний і екстремальний. Знайдено аналітичне рішення при використанні трикутних функцій належності з екстремальним підходом на першому кроці.

В рамках врахування потенційної недостовірності вхідних даних запропоновано процедуру аналізу упередженості моделі, в якій проводиться процедура МММА на тривіальних даних, що дає змогу експерту визначити, наскільки модель є адекватною, до використання на реальних вхідних даних. Розроблено процедуру МММА з відносними оцінками, яка дає змогу більш наглядно представляти результати розрахунків методу, запобігаючи можливим помилкам і невідповідностям уявленням експертів. Досліджено вплив МВЗАП на результати МММА, і запропоновано альтернативний підхід до врахування МВЗАП в МММА, що ґрунтується на принципі витоків і стоків ймовірностей

альтернатив конфігурацій, який в деяких задачах може призвести до більш адекватних результатів.

3. Розроблено прийоми отримання морфологічних таблиць із семантичних мереж, процедури оцінювання альтернатив на основі даних текстової аналітики для інтеграції МММА в процес сценарного аналізу. Сформульовано принципи і особливості побудови морфологічних об'єктів: чітко зазначено типи невизначеностей, характерні для об'єктів морфологічного дослідження, класифіковано типи описів і типи параметрів МТ; сформульовано вимоги до МТ.

Розроблено інтерактивні людино-машинні процедури напівавтоматизованого видобування морфологічних таблиць із семантичних мереж. Запропоновані процедури для трьох типів морфологічного опису, що поступово ускладнюються: опис об'єкту, опис стану об'єкту, опис дії або події. Створені процедури і особливості їх використання продемонстровано на прикладах переведення фрагментів семантичних мереж у морфологічні таблиці.

Розроблено процедури оцінювання вхідних даних в МММА на основі використання результатів текстової аналітики. Ці процедури передбачають існування текстового корпусу з фрагментів інформації, класифікованого засобами текстової аналітики за певними темами, на основі чого формуються як вхідні оцінки альтернатив параметрів, так і оцінки матриць зв'язків. В обох випадках пропонуються альтернативні підходи, вибір яких залежить від задачі і наявної інформації.

4. Розроблено підхід до використання мереж морфологічних таблиць для комплексних задач, що містять велику кількість взаємопов'язаних об'єктів і сутностей. Процедуру двоетапного МММА узагальнено на випадок складних системних задач, в яких взаємодіє значна кількість сутностей. Розглядається більш простий випадок поєднання морфологічних таблиць у вигляді ланцюга, для якого ітеративно застосовуються перший і другий етапи методу, так і загальний випадок довільного поєднання МТ односторонніми та двосторонніми зв'язками, що призводить до необхідності формувати відповідний мережі граф, і обробляти його за допомогою спеціальної процедури.

Розглянуто використання мереж морфологічних таблиць у трьох режимах: оцінювання підготовленості – базова оцінка рішень, що адресують деяку задачу або проблему, для надання підтримки прийняття рішень щодо результативності відповідних заходів; моніторинг – використання МММА у поєднанні з розробленим автоматизованим оцінюванням на основі текстової аналітики для завчасного виявлення потенційно небажаних подій, що можна побачити завдяки перевищенню порогових значень певних оцінок МТ; реакція – розв’язання задачі з фіксованим параметром у випадку, коли небажана подія вже відбулась, і необхідно оперативно прийняти рішення для пом’якшення наслідків. Використання МММА з мережею морфологічних таблиць продемонстровано на прикладі задачі моделювання і пом’якшення наслідків соціальних лих, викликаних катастрофами і тероризмом.

5. Створено програмну реалізацію вдосконаленого МММА на базі SAS Studio з користувацькими модулями мовою C#, які відповідають базовим крокам МММА: конструювання МТ; оцінювання МТ; оцінювання МВЗАП; оцінювання МЗАП; розрахунок оцінок альтернатив параметрів для одноетапної та двохетапної процедур морфологічного аналізу; виведення і візуалізація результатів. Формат розробленого програмного забезпечення дозволяє компонувати модулі у різних конфігураціях для розв’язання задач різної природи і складності.

6. Розроблено інтегрований підхід використання МММА для підтримки прийняття рішень щодо структурно-функціонального планування підземного простору мегаполісів, в рамках якого розроблено стратегію використання різних процедур МММА в процесі сценарного аналізу, що деталізує способи і рамки застосування розроблених елементів методу в залежності від поставлених задач, характеристик вхідних даних.

Створено модель на основі МММА для порівняння ділянок потенційного підземного будівництва на передпроектній стадії на основі аналізу інженерно-геологічних факторів, пов’язаних із ділянкою. Модель використовує двоетапний МММА, де на першому етапі розглядаються 10 інженерно-геологічних параметрів, а на другому визначаються оцінки 6 параметрів, що описують

рішення, в тому числі доцільність чи недоцільність будівництва, доцільні масштаби і рівень забудови, ризики, пов'язані з будівництвом, і їх характеристики.

Створені моделі на основі МММА для оцінювання пріоритетності побудови підземних споруд конкретного призначення, зокрема, паркінгів і автомобільних тунелів. Розглядаються мережі морфологічних таблиць, в яких присутні як інженерно-геологічні фактори із базової задачі, так і структурно-функціональні фактори, які характеризують ділянку з точки зору потреби у відповідному типі підземної споруди. Для оцінювання автомобільних тунелів створена також гібридна модель, що поєднує елементи МММА і методу аналізу ієрархій для формування ранжувань за альтернативною процедурою.

Розроблено прототип моделі на основі двоетапного МММА для порівняння урбаністичних об'єктів з точки зору їх протидії небажаним подіям. В моделі аналізуються характеристики небажаної події, і наслідки, які така подія може викликати для заданого типу урбаністичних об'єктів.

Як узагальнення розглянутих окремих задач, запропонована мережа морфологічних таблиць оцінювання потенціалу території підземного будівництва, яка синтезує функціонально-планувальну організацію міського простору та інженерно-геологічні фактори геологічного середовища для територій, що розглядаються.

7. Розв'язано ряд практичних задач планування підземного простору українських міст в умовах невизначеностей та багатофакторних ризиків, напрацьовано рекомендації для зацікавлених сторін.

Модель порівняння ділянок підземного будівництва на основі інженерно-геологічних факторів випробувана на 4 реальних ділянках м. Києва. Проаналізовано перспективи будівництва на кожній із ділянок з урахуванням отриманих результатів. Проведений аналіз упередженості моделі і процедура виявлення протиріч у МВЗАП для перевірки розроблених процедур, і підвищення довіри до результатів.

Модель оцінювання пріоритетності будівництва паркінгів використана для 2 реальних ділянок м. Києва. Сформульовано висновки щодо переваги однієї з ділянок над іншою.

Модель оцінювання впливів будівництва автомобільних тунелів на фактори ризику використана для аналізу тунелів, будівництво яких передбачене Генеральним планом м. Києва. Задача розглядалась з використанням більш простої моделі для порівняння двох тунелів, і з використанням розширеної моделі, що враховує також безпекові фактори, для всіх 8 тунелів. На основі отриманих результатів обґрунтовано пріоритетність будівництва певних тунелів порівняно з іншими. Залучена комбінована модель на основі МММА і методу аналізу ієрархій, яка підтверджує результати, отримані з використанням МММА окремо, і також демонструє гнучкість використання при експертному підході до оцінювання критеріїв відповідно до пріоритетів ОПР.

Модель оцінювання структурно-функціональних факторів адаптовано до задачі порівняння двох альтернативних ділянок потенційного будівництва Одеського метрополітену, з точки зору їх впливу на ряд факторів – вирішення транспортних проблем, сприяння розвитку міста і туристично-рекреаційному потенціалу, забезпечення цивільного захисту, тощо. На основі цієї моделі отримані результати, що дозволяють порівняти альтернативні проекти за їх впливом на різні сфери міського життя. Для цієї задачі також було проведено аналіз чутливості, який показав, що результати розв'язання є достатньо стійкими і слабо залежать від зміни окремих оцінок вхідних даних.

Морфологічна модель оцінювання впливу небажаних подій на урбаністичні об'єкти була застосована для порівняння системи каналізаційних труб, що проходять по дну р. Дніпро, і підземного дюкера, що використовується з тією ж метою. Результати аналізу показали суттєву перевагу підземного дюкера, що дозволяє рекомендувати його в якості пріоритетного проекту. Також ця модель була використана для порівняння мостового і тунельного переходів р. Дніпро, також підтверджуючи перевагу підземного будівництва з точки зору протидії

несприятливим факторам. Для обох задач аналіз проводився як для множини несприятливих подій, так і для конкретних сценаріїв небажаних подій.

Рекомендується подальше використання розробленої інструментарію для розв'язання практичних задач, пов'язаних із освоєнням підземного простору великих міст, застосуванням для порівняння будь-яких інших об'єктів інфраструктури і формування основ системної стратегії розвитку міського підземного простору з метою мінімізації військових, техногенних і природних загроз.

Подальші дослідження можуть бути пов'язані із інтеграцією запропонованої методології з методами, пов'язаними із машинним навчанням, штучним інтелектом, зокрема розвиток нечіткої модифікації методу і її адаптації до процедур експертного оцінювання; використання нейронних мереж і генеративних моделей для підтримки побудови і оцінювання морфологічних таблиць.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Admiraal H., Cornaro A. Why underground space should be included in urban planning policy – And how this will enhance an urban underground future. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 55. P. 214–220.
2. Álvarez A., Ritchey T. Applications of General Morphological Analysis: From Engineering Design to Policy Analysis. *Acta Morphologica Generalis*. 2015. Vol. 4(1). 40 p.
3. Arens S., Schlüters S., Hanke B., Maydell K.v., Agert C. Sustainable Residential Energy Supply: A Literature Review-Based Morphological Analysis. *Energies*. 2020. Vol. 13(2). 28 p.
4. Baghestani A., Nikbakht M., Kucheva Y., Afshar A. Assessing spatial and racial equity of subway accessibility: Case study of New York City. *Cities*. 2024. Vol. 155. 15 p.
5. Bai X., McPhearson T., Cleugh H., Nagendra H., Tong X., Zhu T., Zhu Y.-G. Linking Urbanization and the Environment: Conceptual and Empirical Advances. *Annual Review of Environment and Resources*. 2017. Vol. 42. P. 215–240.
6. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect. *Mechatronic Futures* / P. Hehenberger, D. Bradley (Eds.). Cham : Springer International Publishing, 2016. P. 59–74.
7. Cagno E., De Ambroggi M., Grande O., Trucco P. Risk analysis of underground infrastructures in urban areas. *Reliability Engineering and System Safety*. 2011. Vol. 96. P. 139–148.
8. Cities have a key role to play in tackling climate change – here’s why. UNDP Climate Promise. 2024. 4 чер. URL: <https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/cities-have-key-role-play-tackling-climate-change-heres-why> (дата звернення 14.12.2024).
9. Correia da Silva L. L. Morphological Analysis of the Introduction of Electric Vehicles in São Paulo's Urban Traffic. *Future Studies Research Journal*. 2011. Vol. 3(1). P. 14–36.

10. Cui J., Lin D. Utilisation of underground pedestrian systems for urban sustainability. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 55. P. 194–204.
11. Curiel-Esparza J., Canto-Perello J. Selecting utilities placement techniques in urban underground engineering. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 13(2). P. 276–285.
12. Dasgupta S., Lall S., Wheeler D. Subways and CO2 emissions: A global analysis with satellite data. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 883. 12 p.
13. Debczak M. Here's How Much Traffic Congestion Costs the World's Biggest Cities. *Mental Floss*. 2018. 11 ЛЮТ. URL: <https://www.mentalfloss.com/article/530705/heres-how-much-traffic-congestion-costs-worlds-biggest-cities> (дата звернення 14.12.2024).
14. Dedić N., Stanier C. Towards Differentiating Business Intelligence, Big Data, Data Analytics and Knowledge Discovery. *Innovations in Enterprise Information Systems Management and Engineering. ERP Future 2016* / F. Piazzolo, V. Geist, L. Brehm, R. Schmidt, (Eds.). *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2017. Vol. 285. Cham : Springer. P. 114–122.
15. Delmastro C., Lavagno E., Schranz L. Underground urbanism: Master Plans and Sectorial Plans. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 55. P. 103–111.
16. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, Vol. 1. Minneapolis, 2019. P. 4171–4186
17. de Waal A., Ritchey T. Combining morphological analysis and Bayesian networks for strategic decision support. *ORiON*. 2007. Vol. 23 (2). P. 105–121.
18. Doyle M. R. From hydro/geology to the streetscape: Evaluating urban underground resource potential. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 55. P. 83–95.

19. Duczynski G. Investigating traffic congestion: Targeting technological and social interdependencies through general morphological analysis. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018. Vol. 126. P. 161–167.
20. Durmisevic S., Sariyildiz S. A systematic quality assessment of underground spaces – public transport stations. *Cities*. 2001. Vol. 18(1). P. 13–23.
21. Facts and Figures Urban areas. European Road Safety Observatory / European Commission, Directorate General for Transport. Brussels, European Commission: 2022. 21 p.
22. Fátima Teles M. A General Morphological Analysis for Mapping Strategic Sustainability Decision-Making in Public Transport Companies. Porto, 2022. 254 p.
23. Finio N. Measurement and Definition of Gentrification in Urban Studies and Planning. *Journal of Planning Literature*. 2022. Vol. 37(2). P. 249–264.
24. The Future We Don't Want: How Climate Change Could Impact the World's Greatest Cities. UCCRN Technical Report / Urban Climate Change Research Network. 2018. URL: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/The-future-we-don-t-want-How-climate-change-could-impact-the-world-s-greatest-cities?language=en_US (дата звернення 14.12.2024).
25. Gaigbe-Togbe V. The impact of socio-economic inequalities on early childhood survival: Results from the demographic and health surveys. United Nations, Population Division. 2015. 30 p.
26. Gaultier G., Boisson M. Development of urban geothermal systems: how to promote a sustainable approach? // European Geothermal Congress, 11–14 June 2019. Den Haag, The Netherlands, 2019. 9 p.
27. Genger T. K., Luo Y., Hammad A. Multi-criteria spatial analysis for location selection of multi-purpose utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 115. 22 p.
28. Ghodsvali M., Dane G., de Vries B. An integrated decision support system for the urban food-water-energy nexus: Methodology, modification, and model formulation. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2023. Vol. 100. 14 p.

29. Goines L., Hagler L. Noise Pollution: A Modern Plague. *Southern Medical Journal*. 2007. Vol. 100. P. 287–294.
30. Goldberg Y. A Primer on Neural Network Models for Natural Language Processing. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2016. Vol. 57. P. 345–420.
31. Gracht H. A. Consensus measurement in Delphi studies, review and implications for future quality assurance. *Technological Forecasting and Social Change*. 2012. Vol. 79(8). P. 1525–1536.
32. Grieves M. W. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice* / S. Flumerfelt, K. G. Schwartz, D. Mavris, S. Briceno (eds.). Vol. 256. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. P. 175–200.
33. Grubler A., Fisk. D. Energizing Sustainable Cities. Assessing Urban Energy. London, 2013. 213 p.
34. Haiko H., Savchenko I. System Approach to Predictive Evaluation of Underground Objects Using Modified Morphological Analysis Method. *Geominig: Systems and Decision-Oriented Perspective* / A. Shukurov, O. Vovk, A. Zaporozhets, N. Zuievskaya (eds). Cham : Springer, 2024. P. 235–249.
35. Haiko H., Savchenko I., Haiko Y. Functional Planning Optimization of Exploiting Underground Space in Large Cities Using System Methodology. *Studies in Computational Intelligence*. 2023. Vol. 1107. P. 43–61.
36. Haiko H. I., Savchenko I. O., Matviichuk I. O. Development of a morphological model for territorial development of underground city space. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. Vol. 3. P. 92–98.
37. Haiko H., Savchenko I., Matviichuk I. A Morphological Analysis Method-Based Model of Assessing Territories for Underground Parking Lots // 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing (SAIC), 5–9 October, Kyiv, 2020. P. 173–176.
38. Hashem I. A. T., Yaqoob I., Anuar N. B., Mokhtar S., Gani A., Khan S. U. The rise of “big data” on cloud computing: Review and open research issues. *Information Systems*. 2015. Vol. 47. P. 98–115.

39. Hitzler P., Kroetzsch M., Rudolph S. Foundations of Semantic Web Technologies. Chapman & Hall/CRC, 2009. 456 p.
40. Hoffmann B., Moebus S., Stang A., Beck E.-M., Dragano N., Möhlenkamp S., Schmermund A., Memmesheimer M., Mann K., Erbel R., Jöckel K.-H. Residence close to high traffic and prevalence of coronary heart disease. *European Heart Journal*. 2006. Vol. 27. P. 2696–2702.
41. Hooimeijer F. L., Maring L. The significance of the subsurface in urban renewal. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*. 2018. Vol. 11(3). P. 303–328.
42. Hoolohan C., McLachlan C., Larkin A. ‘Aha’ moments in the water-energy-food nexus: A new morphological scenario method to accelerate sustainable transformation. *Technological Forecasting and Social Change*. 2019. Vol. 148. 14 p.
43. Hsu C. C., Sandord B. A. The Delphi technique: making sense of consensus. *Practical Assessment, Research and Evaluation*. 2007. Vol. 12(10). P. 1–7.
44. Huanqing Li, Xiaozhao Li, Chee Kiong Soh. An integrated strategy for sustainable development of the urban underground: From strategic, economic and societal aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 55. P. 67–82.
45. Hwang C. L., Lai Y. J., Liu T. Y. A new approach for multiple objective decision making. *Computers and Operational Research*. 1993. Vol. 20(8). P. 889–899.
46. Ji S.-H., Ahn J. Scenario-Planning Method for Cost Estimation Using Morphological Analysis. *Advances in Civil Engineering*. 2019. 10 p.
47. Jones K. S. A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval. *Journal of Documentation*. 2004. Vol. 60(5). P. 493–502.
48. Keet C. M. An Introduction to Ontology Engineering. University of Cape Town, 2018. 306 p.
49. Kennedy C.A., Stewart I., Facchini A., Cersosimo I., Mele R., Chen B., Uda M., Kansal A., Chiu A., Kim K., Dubeux C., Lebre La Rovere E., Cunha B., Pincetl S., Keirstead J., Barles S., Pusaka S., Gunawan J., Adegbile M., Nazariha M., Hoque S., Marcotullio P.J., González Otharán F., Genena T., Ibrahim N., Farooqui R., Cervantes

G., Sahin A.D. Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.* 2015. Vol. 112(19). P. 5985–5990.

50. Lall S., Dasgupta S., Wheeler D. Subways cut urban CO2 emissions in half, study shows. *World Economic Forum*. 2024. 25 січ. URL: <https://www.weforum.org/stories/2024/01/subways-cut-co2-emissions-half-study> (дата звернення 14.12.2024).

51. Lantada N., Carreño M. L., Jaramillo N. Disaster risk reduction: A decision-making support tool based on the morphological analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. Vol. 42. 17 p.

52. Lentini A., Galve J. P., Benjumea B., Bricker S., Devleeschouwer X., Guarino P. M., Kearsey T., Leoni G., Puzzilli L. M., Romeo S., Venvik G., La Vigna F. The Urban Geo-climate Footprint approach: Enhancing urban resilience through improved geological conceptualisation. *Cities*. 2024. Vol. 155. 15 p.

53. Li H.-Q., Li X.-Z., Parriaux A., Thalmann P. An integrated planning concept for the emerging underground urbanism: Deep City Method Part 2 case study for resource supply and project valuation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013. Vol. 38. P. 569–580.

54. Li H.-Q., Parriaux A., Thalmann P., Li X.-Z. An integrated planning concept for the emerging underground urbanism: Deep City Method Part 1 concept, process and application. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013. Vol. 38. P. 559–568.

55. Lichte D., Torres F. S., Engler E. Framework for Operational Resilience Management of Critical Infrastructures and Organizations. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7(5). 28 p.

56. Loibl W., Neumann H.-M., Etminan G. (2020) Multicriteria Assessment of Urban Development Projects – from Objectives to a Project Priority List. // Proceedings of REAL CORP 2020, 25th International Conference on Urban Development, Regional Planning and Information Society, 15–18 September 2020. P. 1163–1168.

57. Makana L. O., Jefferson I., Hunt D. V. L., Rogers C. D. F. Assessment of the future resilience of sustainable urban sub-surface environments. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 55. P. 21–31.
58. Martins F., Almeida M. F., Calili R., Oliveira A. Design Thinking Applied to Smart Home Projects: A User-Centric and Sustainable Perspective. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(23). 28 p.
59. Martins H. Urban compaction or dispersion? An air quality modelling study. *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 54. P. 60–72.
60. Mikolov T., Karafiát M., Burget L., Černocký J., Khudanpur S. Recurrent neural network based language model // Interspeech 2010, 26–30 September, Makuhari, Chiba, Japan, 2010. P. 1045–1048.
61. Miller G. A. The magical number seven plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*. 1956. Vol. 63. P. 81–97.
62. Mills G., Cleugh H., Emmanuel R., Endlicher W., Erell E., Mcgranahan, G., Ng E., Nickson A., Rosenthal J., Steemers, K. Climate Information for Improved Planning and Management of Mega Cities (Needs Perspective). *Procedia Environmental Sciences*. 2010. Vol. 1. P. 228–246.
63. Monnikhof R., Edelenbos J., van der Krogt R. How to Determine the Necessity for Using Underground Space: an integral assessment method for strategic decision-making. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1998. Vol. 13(2) P. 167–172.
64. Münzel T., Schmidt F. P., Steven S., Herzog J., Daiber A., Sørensen M. Environmental Noise and the Cardiovascular System. *Journal of the American College of Cardiology*. 2018. Vol. 71(6). P. 688–697.
65. Nedashkovskaya N. Comparison Analysis of Prioritization Quality Criteria Using Paired Comparison Method of Prioritization // 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 4–7 October, Kyiv, 2022. P. 39–44.

66. Nezarat H., Sereshki F., Ataei M. Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 50. P. 358–364.
67. Parker H. W. Underground Space: Good for Sustainable Development, and Vice Versa // International Tunnelling Association (ITA) Open Session, World Tunnel Congress, Singapore, May 2004. Singapore. 17 p.
68. Pankratova N. D. System analysis: Theory and applications : textbook. Kyiv : Naukova Dumka, 2018. 347 p.
69. Pankratova N. D., Bidyuk P. I., Selin Y. M., Savchenko I. O., Malafeeva L. Y., Makukha M. P., Savastiyarov V. V. Foresight and Forecast for Prevention, Mitigation and Recovering after Social, Technical and Environmental Disasters. *Improving Disaster Resilience and Mitigation - IT Means and Tools*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. 2014. P. 119–134.
70. Pankratova N. D., Gayko G. I., Kravets V. G., Savchenko I. A. Problems of Megapolises Underground Space System Planning. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48, Issue 4. P. 32–38.
71. Pankratova N. D., Gorelova G. V., Pankratov V. A. The Strategy of Underground Construction Objects Planning Based on Foresight and Cognitive Modelling Methodologies. *System Analysis & Intelligent Computing* / M. Zgurovsky, N. Pankratova (Eds.). Springer, 2022. P. 69–91.
72. Pankratova N., Grishyn K., Barilko V. Digital twins: stages of concept development, areas of use, prospects. *System research and information technologies*. 2023. No. 2. P. 7–21.
73. Pankratova N., Haiko H., Savchenko I. Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. Cham : Springer, 2024. 256 p.
74. Pankratova N. D., Haiko H. I., Savchenko I. O. Morphological model for underground crossings of water objects. *System Research and Information Technologies*. 2021. No. 4. P. 53–67.

75. Pankratova N. D., Nedashkovskaya N. I. Evaluating multifactor risks under conceptual uncertainty. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2009. Vol. 45(2). P. 223–231.

76. Pankratova N. D., Nedashkovskaya, N. I. Evaluation of Ecology Projects for Black Sea Odessa Region on Basis of a Network BOCR Criteria Model // IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 8–12 October, Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018.

77. Pankratova N. D., Nedashkovskaya N. I. Hybrid Method of Multicriteria Evaluation of Decision Alternatives *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50(5). P. 701–711.

78. Pankratova, N. D., Nedashkovskaya, N. I. Method for processing fuzzy expert information in prediction problems. Part I. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2007. Vol. 39(4). P. 26–36.

79. Pankratova N. D., Pankratov V. A. Modeling of scenarios for the underground construction planning based on the foresight and cognitive modeling methodologies. *Доповіди Національної академії наук України*. 2021. № 5. С. 18–24.

80. Pankratova N. D., Pankratov V. A. System approach to the underground construction objects planning based on foresight and cognitive modelling methodologies. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2022, № 1. С. 7–25.

81. Pankratova N., Savchenko I. Detecting and Constructing Morphological Tables Using Weakly Structured Data Analysis Results // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3503, 2022. P. 42–51.

82. Pankratova N., Savchenko I., Gayko G., Kravets V. Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018. Vol. 50, Issue 10. P. 34–46.

83. Pankratova N., Savchenko I., Haiko H., Kravets V. System Approach to Planning Urban Underground Development. *International Journal "Information Content and Processing"*. 2019. Vol. 6, No. 1. P. 3–17.

84. Payan A. P., Mavris D. N. Multilevel Probabilistic Morphological Analysis for Facilitating Modeling and Simulation of Notional Scenarios. *Systems Engineering*. 2016. Vol. 19(1). P. 3–23.
85. Pereverza K., Pasichnyi O., Lazarevic D., Kordas O. Strategic planning for sustainable heating in cities: A morphological method for scenario development and selection. *Applied Energy*. 2017. Vol. 186(2). P. 115–125.
86. Pu J., Huang Yu, Bi Y., Guo Zh., Deng F., Li X., Xu Ch. 3D suitability evaluation of urban underground space using a variable weight method and considering ground restrictions. *Underground Space*. 2024. Vol. 19. P. 208–226.
87. Pyzyk K. Gridlock woes: Traffic congestion by the numbers. Smart Cities Dive. 2018. 27 бер. URL: <https://www.smartcitiesdive.com/news/gridlock-woes-traffic-congestion-by-the-numbers/519959> (дата звернення 14.12.2024).
88. Raofi Z., Stenemo E., Engholm A., Pernestål A. How can we structure the future development of automation, electrification, and digitalization in the transportation sector by using morphological analysis? *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 1808–1815.
89. Ritchey T. Futures Studies using Morphological Analysis // Adapted from an article for the UN University Millennium Project: Futures Research Methodology Series, 2005. 14 p. URL: <https://swemorph.com/pdf/futures.pdf> (дата звернення 16.12.2024).
90. Ritchey T. Modeling Alternative Futures with General Morphological Analysis. *World Future Review*. 2011. Pp. 83–94.
91. Ritchey T. Modeling Complex Socio-Technical Systems using Morphological Analysis // Adapted from an address to the Swedish Parliamentary IT Commission, Stockholm, December 2002. 16 p. URL: <https://swemorph.com/pdf/it-webart.pdf> (дата звернення 16.12.2024).
92. Ritchey T. Morphospaces: A Catalogue of 52 Morphological Models from selected GMA Projects. *Acta Morphologica Generalis*. 2022. Vol. 8(1). 56 p.
93. Ritchey T. Problem Structuring using computer-aided morphological analysis. *Journal of the Operational Research Society*. 2006. No. 57. P. 792–801.

94. Ritchey T. Strategic Decision Support using Computerised Morphological Analysis // 9th International Command and Control Research and Technology Symposium, Copenhagen, 14–16 September, 2004. 8 p. URL: <https://swemorph.com/pdf/iccrts1.pdf> (дата звернення 16.12.2024).
95. Roubelat Marchais-Roubelat F. The Delphi method as a ritual: inquiring the Delphi Oracle. *Technological Forecasting & Social Change*. 2011. Vol. 78(9). P. 1491–1499.
96. Saaty T. L. Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. Pittsburgh : RWS Publications, 2008. 292 p.
97. Saaty T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*. 1990. Vol. 48(1). P. 9–26.
98. Saaty T. L., Vargas L. G. Decision Making with the Analytic Network Process. Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. New York : Springer, 2016. 363 p.
99. Sarkodie S. A., Owusu P. A., Leirvik T. Global effect of urban sprawl, industrialization, trade and economic development on carbon dioxide emissions. *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15(3). 11 p.
100. Savchenko I. Detecting and Handling Flawed Input Data in Modified Morphological Analysis Method // 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 4–7 October, Kyiv, 2022. P. 28–31.
101. Savchenko I. O. Estimating the Solution Sensitivity in Application of the Modified Morphological Analysis Method. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016. Vol. 52, Issue 5. P. 782–790.
102. Savchenko I. Estimation of Morphological Tables Using Text Analysis Results. *Computer Science Journal of Moldova*. 2016. Vol. 24, No. 2(71). P. 148–156.
103. Savchenko I. O. Modeling complex socio-technical systems using networks of morphological tables // System analysis and information technology : Proceedings of the 17-th International conference SAIT 2015, June 22–25, Kyiv, 2015. P. 43.

104. Savchenko I. Modeling Disasters Using Networks of Morphological Tables // Conference on Mathematical Foundations of Informatics : Proceedings MFOI-2017, November 9–11, 2017, Chisinau, Moldova. P. 162–165.

105. Savchenko I. New Approach for Processing Cross-Consistency Matrix in Modified Morphological Analysis Method // 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing (SAIC), 5–9 October, Kyiv, 2020. P. 167–172.

106. Savchenko I. O. Using Morphological Table Networks for Modeling Social Disaster Situations // 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 8–12 October, Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. P. 105–108.

107. Schindler M., Caruso G. Urban compactness and the trade-off between air pollution emission and exposure: Lessons from a spatially explicit theoretical model. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2014. Vol. 45. P. 13–23.

108. Seeve T., Vilkkumaa E. Identifying and visualizing a diverse set of plausible scenarios for strategic planning. *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 298(2). P. 596–610.

109. Song J., Abuduwayiti A., Gou Zh. The role of subway network in urban spatial structure optimization – Wuhan city as an example. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023. Vol. 131. 12 p.

110. Stachura P., Kuligowska K. Multi-criteria analysis of urban policy for sustainable development decision-making: A case study for Warsaw city, Poland. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 192. P. 259–269.

111. Sterling R., Admiraal H., Bobylev N., Parker H., Godard J. P., Vähäaho I., Shi X., Hanamura T.. Sustainability issues for underground spaces in urban areas. *Proceedings of ICE. Urban Design and Planning*. 2012. Vol. 165(4). P. 241–254.

112. Sun H., Lan H., He Z., Pan X., Zhang R., Zhang P., Tong J. Dynamic resilience assessment and multi-objective optimization decision-making for urban roadway tunnel system in the face of fire disaster. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025. Vol. 155(1). (pre-print) 34 p.

113. Śmieszek M., Kostian N., Mateichyk V., Mościszewski J., Tarandushka L. Determination of the Model Basis for Assessing the Vehicle Energy Efficiency in Urban Traffic. *Energies*. 2021. Vol. 14(24). 18 p.

114. Tabulation on Place of Work or Schooling for Population and Labour Force of the 2015 Population Census / Statistics Bureau of Japan. Tokyo, 2015. URL: <https://www.stat.go.jp/english/data/kokusei/2015/summary.htm> (дата звернення 14.12.2024).

115. Underground Engineering for Sustainable Urban Development / National Academies of the U.S.A. Washington : The National Academies Press, 2013. 230 p.

116. van Os H. W. A., Herber R., Scholtens B. Subsurface activities and decision support systems: An analysis of the requirements for a social acceptance-motivated decision support system. *Environmental Impact Assessment Review*. 2016. Vol. 60. P. 176–185.

117. Vähäaho I. Underground space planning in Helsinki. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014. No. 6. P. 387–398.

118. von der Tann L., Sterling R., Zhou Y., Metje N. Systems approaches to urban underground space planning and management – A review. *Underground Space*. 2020. Vol. 5(2). P. 144–166.

119. Wang J., Duan H., Chen K., Chan I. Y. S., Xue F., Zhang N., Chen X., Zuo J. Role of Urban Underground-Space Development in Achieving Carbon Neutrality: A National-Level Analysis in China. *Engineering*. 2024. (pre-print). 15 p. DOI: 10.1016/j.eng.2024.07.012.

120. Witte D., Lichte D., Wolf C.-D. Threat Analysis: Scenarios and Their Likelihoods // Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, Singapore, 2020. Singapore : Research Publishing, 2020. P. 4589–4595.

121. Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 6 July 2017 / United Nations, 2017. 25 p.

122. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision / United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York: United Nations, 2019. 126 p.

123. Yeung Y.-M., Shen J., Kee G. Megacities. *International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition)* / A. Kobayashi (editor). Elsevier, 2020. P. 31–38.

124. Zeiler W. Morphology in conceptual building design. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018. Vol. 126. P. 102–115.

125. Zgurovsky M., Gvishiani A. Sustainable Development Global Simulation: Quality of Life and Security of the World Population. Kyiv : Polytekhnika, 2008. 333 p.

126. Zhu H., Huang X., Li X., Zhang L., Liu X. Evaluation of urban underground space resources using digitalization technologies. *Underground Space*. 2016. Vol. 1(2). P. 124–136.

127. Zhu Y., Jiao L., Zhang Y., Wu Y., Huo X. Sustainable Development of Urban Metro System: Perspective of Coordination between Supply and Demand. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. 24 p.

128. Zwicky F., Wilson A. G. New Methods of Thought and Procedure // Contributions to the Symposium on Methodologies, Pasadena, May 22–24, 1967. P. 273–297.

129. Гайко Г. І. Освоєння підземного простору в концепції сталого розвитку великих міст. *Геотехнології*. 2018. Вип. 1. С. 60–64.

130. Гайко Г. І. Проблеми системного планування підземного простору великих міст. *Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво»*. 2014. Вип. 25. С. 35–40.

131. Гайко Г. І., Булгаков В. П., Сіверин М. М. Система автомобільних тунелів як спосіб розв'язання транспортних і екологічних проблем мегаполісу. *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут», серія «Гірництво»*. 2016. Вип. 30. С. 196–206.

132. Гайко Г. І., Кравець В. Г., Булгаков В. П., Гайко Ю. І. Транспортноорієнтована природничо-технічна геосистема «геоурбаністика – геологічне середовище». *Вісник НТУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2015. Випуск 29. С. 18–24.

133. Гайко Г. І., Матвійчук І. О., Білецький В. С., Салуга П. Методи прогновної оцінки сприятливості геологічного середовища будівництву об'єктів підземної урбаністики. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*. 2018. № 48. С. 39–51.

134. Гайко Г., Назаренко І., Савченко І. Комбінована модель підтримки прийняття рішень щодо пріоритетів розвитку мережі автомобільних тунелів Києва. *Техніка будівництва*. 2024. Вип. 40. С. 53–64.

135. Гайко Г. І., Савченко І. О., Вапнічна В. В. Морфологічна модель розвитку підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору. *Науково-технічний журнал «Геоінженерія»*. 2020. Вип. 4. С. 7–18.

136. Гайко Г. І., Савченко І. О., Матвійчук І. О. Оцінювання ділянок будівництва підземних паркінгів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. № 15. С. 18-25.

137. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. Москва : Наука, 1966. 576 с.

138. Генеральний план міста Києва. Основні положення (Проект), Київ. URL: <https://www.slideshare.net/andrewvodiany/230454864>. (дата звернення 17.12.2024).

139. Генеральний план м. Одеси. URL: <https://omr.gov.ua/ua/city/departments/uag/generalniy-plan-g-odessi> (дата звернення 17.12.2024).

140. Жерарден Л. Морфологический анализ – метод творчества. *Руководство по научно-техническому прогнозированию*. Москва : Прогресс, 1977. С. 221–234.

141. Жилияков Е. Г. Адаптивное определение относительных важностей объектов на основе качественных парных сравнений. *Экономика и математические методы*. 2006. Т.42, №2. С.111–122.

142. Зайченко А. Є., Савченко І. О. Система підтримки прийняття рішень на основі мережі морфологічних таблиць для аналізу лісової пожежі // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали 20-ї Міжнародної науково-технічної

конференції SAIT 2018, 21–24 травня 2018 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Горя Сікорського”, 2018. С. 61–62.

143. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Системний аналіз: Методологія. Проблеми. Приложения : монографія, 2-е видання, перероблене та доповнене. Київ : Наукова думка, 2016. 726 с.

144. Згуровский М. З., Панкратова Н. Д. Технологическое предвидение. Київ : ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2005. 156 с.

145. Матвійчук І. О. Планування підземного простору мегаполісів у змінному геологічному середовищі: дис. ... д-ра філософії : 184 Гірництво. Київ, 2020. 205 с.

146. Недашківська Н. І. Оцінювання чутливості розв'язку задачі прийняття рішень із застосуванням методу аналізу ієрархій. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2006. №2. С. 27–36.

147. Одрин В. М., Картавов С. С. Метод морфологического анализа технических систем. Москва : ВНИИПИ, 1989. 312 с.

148. Одрин В. М. Морфологический анализ систем. Киев : Наукова думка, 1977. 183 с.

149. Панкратова Н. Д., Гайко Г. И., Кравец В. Г., Савченко И. А. Проблемы системного планирования подземного пространства мегаполисов. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2016. Вып. 2. С.101–107.

150. Панкратова Н. Д., Гайко Г. І., Савченко І. О. Визначення пріоритетів розвитку підземної інфраструктури мегаполісів на основі системної методології. *Науково-технічний журнал «Геоінженерія»*. 2021. Вип. 6. С. 17–27.

151. Панкратова Н. Д., Гайко Г. І., Савченко І. О. Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проектних конфігурацій. Київ : Наукова думка, 2020. 152 с.

152. Панкратова Н. Д., Малафєєва Л. Ю. Метод Делфі. Теорія та застосування : Навчальний посібник. Київ : Наукова думка, 2017. 248 с.

153. Панкратова Н. Д., Недашківська Н. І. Комплексне оцінювання чутливості рішення на основі методу аналізу ієрархій. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2006. №3. С. 7–25.

154. Панкратова Н. Д., Недашківська Н. І. Моделі і методи аналізу ієрархій: Теорія. Застосування : навч. посіб. Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2010. 371 с.

155. Панкратова Н., Недашківська Н., Гайко Г., Білецький В. Оцінювання екологічних ризиків розвитку підземної транспортної інфраструктури методом ВОСР. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2021. Вип. 55. С. 285–298.

156. Панкратова Н. Д., Савченко І. О. Виявлення і побудова морфологічних таблиць на основі результатів аналізу слабкоструктурованих даних // *Інформаційні технології та безпека : Матеріали ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції*, вип. 22. Київ : Інжиніринг, 2022. с. 59–61.

157. Панкратова Н. Д., Савченко І. О. Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування : навчальний посібник. Київ : Наукова думка, 2015. 245 с.

158. Панкратова Н. Д., Савченко І. О. Застосування методу морфологічного аналізу до задач технологічного передбачення. *Наукові праці, Миколаївський державний гуманітарний університет ім. Петра Могили комплексу НаУКМА, серія Комп'ютерні технології, системний аналіз, моделювання*. 2008. – Вип. 77, т. 90. С. 6–13.

159. Панкратова Н. Д., Савченко І. О. Стратегія застосування методу морфологічного аналізу в процесі технологічного передбачення. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2009. №2. С. 35–44.

160. Панкратова Н. Д., Савченко І. А., Гайко Г. І., Кравець В. Г. Оценивание перспектив городского подземного строительства на основе модифицированного метода морфологического анализа. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2018. Вып. 5. С. 91–102.

161. Панкратова Н. Д., Савченко І. О., Гайко Г. І., Кравець В. Г. Системний підхід до освоєння підземного простору мегаполісів в умовах невизначеностей та

багатофакторних ризиків. *Доповіді Національної академії наук України*. 2018. №10. С. 18–25.

162. Проектування міських територій : підручник : у 2 ч. Ч.1 / [за ред. В. Т. Семенова, І. Е. Линник] ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 449 с.

163. Савченко І. О. Декомпозиція задач з великою кількістю параметрів в модифікованому методі морфологічного аналізу // Інформатика та системні науки (ІСН-2013) : Матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф., 21–23 березня 2013 р., Полтава : ПУЕТ, 2013. С. 266–268.

164. Савченко І. О. Комп'ютерна програма «Одноетапна процедура модифікованого методу морфологічного аналізу» : Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, Україна. №132163. Заявл. 21.10.2024 р. ; опубл. 18.12.2024 р.

165. Савченко І. О. Методологічне і математичне забезпечення розв'язання задач передбачення на основі модифікованого методу морфологічного аналізу: дис. ... кандидата тех. наук : 01.05.04. Київ, 2012. 168 с.

166. Савченко І. О. Методологічне і математичне забезпечення розв'язання задач передбачення на основі модифікованого методу морфологічного аналізу. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2011. №3. С. 18–28.

167. Савченко І. О. Отримання вхідних даних в модифікованому методі морфологічного аналізу на основі текстової аналітики // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2014) : матеріали 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 26–30 травня 2014 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2014. С. 152.

168. Савченко И. А. Оценивание чувствительности решения при использовании модифицированного метода морфологического анализа. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. Т. 52, Вып. 5. С. 139–148.

169. Савченко І. О. Оцінювання чутливості двохетапної процедури модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2017) : матеріали 19-ї Міжнародної науково-

технічної конференції, 22–25 травня, Київ. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. С. 115.

170. Савченко І. О. Стратегія формування сценаріїв на основі груп конфігурацій в модифікованому методі морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2013) : матеріали 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 27–31 травня 2013 р., Київ. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2013. С. 181.

171. Савченко И. А. Эволюция объекта исследования с привлечением модифицированного метода морфологического анализа. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2015. №2. С. 122–130.

172. Савченко І. О., Гайко Г. І. Методика оцінки екологічних і техногенних ризиків при плануванні підземного простору великих міст // Енергетика. Екологія. Людина : Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського. Київ : ІЕЕ, 2021. С. 127–134.

173. Савченко І. О., Іваненко Є. В. Моделювання воєнних конфліктів за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2016) : матеріали 18-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 30 травня – 2 червня 2016 р., Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2016. С. 151.

174. Соколов Н. П. Введение в теорию многомерных матриц. Киев : Наукова думка, 1972. 175 с.

175. Федорів П. Що таке джентрифікація і чи є вона в Україні. Mistosite. 2019. 9 січ. URL: <https://mistosite.org.ua/uk/articles/shcho-take-dzhentryfikatsiia-i-chu-ie-vona-v-ukraini> (дата звернення 14.12.2024).

176. Шибырин А. Р., Савченко І. О. Система підтримки прийняття рішень на основі двохетапного модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали 20-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2018, 21–24 травня 2018 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2018. С. 98.

Додаток А

Список опублікованих праць за темою дисертації

Монографії

1. Панкратова Н. Д., Гайко Г. І., **Савченко І. О.** Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій. Київ : Наукова думка, 2020. 152 с.

2. Pankratova N., Haiko H., **Savchenko I.** Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. Cham : Springer, 2024. 256 p. (*індексується SCOPUS*)

Розділи у колективних монографіях

3. Haiko H., **Savchenko I.** System Approach to Predictive Evaluation of Underground Objects Using Modified Morphological Analysis Method. *Geominig: Systems and Decision-Oriented Perspective* / A. Shukurov, O. Vovk, A. Zaporozhets, N. Zuiavska (eds). Cham : Springer, 2024. P. 235–249. (*індексується SCOPUS*)

Статті у наукових фахових виданнях

4. Pankratova N. D., Bidiuk P. I., Selin Y. M., **Savchenko I. O.**, Malafeeva L. Y., Makukha M. P., Savastiyarov V. V. Foresight and Forecast for Prevention, Mitigation and Recovering after Social, Technical and Environmental Disasters. *Improving Disaster Resilience and Mitigation - IT Means and Tools*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. 2014. P. 119–134. (*закордонне видання, індексується SCOPUS*)

5. **Савченко І. А.** Эволюция объекта исследования с привлечением модифицированного метода морфологического анализа. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2015. №2. С. 122–130. (*фахове видання*)

6. **Savchenko I.** Estimation of Morphological Tables Using Text Analysis Results. *Computer Science Journal of Moldova*. 2016. Vol. 24, No. 2(71). P. 148–156. (закордонне видання, індексується *Web of Science*)

7. **Савченко И. А.** Оценивание чувствительности решения при использовании модифицированного метода морфологического анализа. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. Т. 52, Вып. 5. С. 139–148. (фахове видання)

8. Панкратова Н. Д., **Савченко И. А.**, Гайко Г. И., Кравец В. Г. Оценивание перспектив городского подземного строительства на основе модифицированного метода морфологического анализа. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2018. Вып. 5. С. 91–102. (фахове видання)

9. Панкратова Н. Д., **Савченко И. О.**, Гайко Г. И., Кравец В. Г. Системний підхід до освоєння підземного простору мегаполісів в умовах невизначеностей та багатофакторних ризиків. *Доповіді Національної академії наук України*. 2018. №10. С. 18–25. (фахове видання)

10. Гайко Г. И., **Савченко И. О.**, Матвійчук І. О. Оцінювання ділянок будівництва підземних паркінгів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. № 15. С. 18-25. (фахове видання)

11. Pankratova N., **Savchenko I.**, Haiko H., Kravets V. System Approach to Planning Urban Underground Development. *International Journal "Information Content and Processing"*. 2019. Vol. 6, No. 1. P. 3–17. (закордонне видання)

12. Гайко Г. И., **Савченко И. О.**, Вапнічна В. В. Морфологічна модель розвитку підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору. *Науково-технічний журнал «Геоінженерія»*. 2020. Вип. 4. С. 7–18. (фахове видання категорії «Б»)

13. Pankratova N. D., Haiko H. I., **Savchenko I. O.** Morphological model for underground crossings of water objects. *System Research and Information*

Technologies. 2021. No. 4. P. 53–67. (фахове видання категорії «А», індексується **SCOPUS**)

14. Панкратова Н. Д., Гайко Г. І., **Савченко І. О.** Визначення пріоритетів розвитку підземної інфраструктури мегаполісів на основі системної методології. *Науково-технічний журнал «Геоінженерія»*. 2021. Вип. 6. С. 17–27. (фахове видання категорії «Б»)

15. Haiko H., **Savchenko I.**, Haiko Y. Functional Planning Optimization of Exploiting Underground Space in Large Cities Using System Methodology. *Studies in Computational Intelligence*. 2023. Vol. 1107. P. 43–61. (закордонне видання, індексується **SCOPUS**)

**Статті у виданнях, віднесених до першого - третього квартилів (Q1-Q3)
відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal
Citation Reports**

16. **Savchenko I. O.** Estimating the Solution Sensitivity in Application of the Modified Morphological Analysis Method. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016. Vol. 52, Issue 5. P. 782–790. (закордонне видання, індексується **Web of Science, SCOPUS Q2**)

17. Pankratova N. D., Gayko G. I., Kravets V. G., **Savchenko I. A.** Problems of Megapolises Underground Space System Planning. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48, Issue 4. P. 32–38. (закордонне видання, індексується **SCOPUS Q3**)

18. Pankratova N., **Savchenko I.**, Gayko G., Kravets V. Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018. – Vol. 50, Issue 10. P. 34–46. (закордонне видання, індексується **SCOPUS Q3**)

19. Haiko H. I., **Savchenko I. O.**, Matviichuk I. O. Development of a morphological model for territorial development of underground city space. *Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. Vol. 3. P. 92–98. (фахове видання категорії «А», індексується **SCOPUS Q2**)

Матеріали конференцій

20. **Савченко І. О.** Декомпозиція задач з великою кількістю параметрів в модифікованому методі морфологічного аналізу // Інформатика та системні науки (ІСН-2013) : Матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф., 21–23 березня 2013 р., Полтава : ПУЕТ, 2013. С. 266–268. *(заочна участь)*

21. **Савченко І. О.** Стратегія формування сценаріїв на основі груп конфігурацій в модифікованому методі морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2013) : матеріали 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 27–31 травня 2013 р., Київ. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2013. С. 181. *(очна участь)*

22. **Савченко І. О.** Отримання вхідних даних в модифікованому методі морфологічного аналізу на основі текстової аналітики // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2014) : матеріали 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 26–30 травня 2014 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2014. С. 152. *(очна участь)*

23. **Savchenko I. O.** Modeling complex socio-technical systems using networks of morphological tables // System analysis and information technology : Proceedings of the 17-th International conference SAIT 2015, June 22–25, Kyiv, 2015. P. 43. *(очна участь)*

24. **Савченко І. О.,** Іваненко Є. В. Моделювання воєнних конфліктів за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2016) : матеріали 18-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 30 травня – 2 червня 2016 р., Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2016. С. 151. *(очна участь)*

25. **Савченко І. О.** Оцінювання чутливості двохетапної процедури модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT 2017) : матеріали 19-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 22–25 травня, Київ. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. С. 115. *(очна участь)*

26. **Savchenko I.** Modeling Disasters Using Networks of Morphological Tables // Conference on Mathematical Foundations of Informatics : Proceedings MFOI-2017, November 9–11, 2017, Chisinau, Moldova. P. 162–165. *(очна участь)*

27. Зайченко А. Є., **Савченко І. О.** Система підтримки прийняття рішень на основі мережі морфологічних таблиць для аналізу лісової пожежі // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали 20-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2018, 21–24 травня 2018 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2018. С. 61–62. *(очна участь)*

28. Шибирин А. Р., **Савченко І. О.** Система підтримки прийняття рішень на основі двохетапного модифікованого методу морфологічного аналізу // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали 20-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2018, 21–24 травня 2018 р. Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2018. С. 98. *(очна участь)*

29. **Savchenko I. O.** Using Morphological Table Networks for Modeling Social Disaster Situations // 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 8–12 October, Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. P. 105–108. *(очна участь. Індексується Web of Science, SCOPUS)*

30. Haiko H., **Savchenko I.**, Matviichuk I. A Morphological Analysis Method-Based Model of Assessing Territories for Underground Parking Lots // 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing (SAIC), 5–9 October, Kyiv, 2020. – P. 173–176. *(очна участь. Індексується SCOPUS)*

31. **Savchenko I.** New Approach for Processing Cross-Consistency Matrix in Modified Morphological Analysis Method // 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing (SAIC), 5–9 October, Kyiv, 2020. P. 167–172. *(очна участь. Індексується SCOPUS)*

32. **Савченко І. О.**, Гайко Г. І. Методика оцінки екологічних і техногенних ризиків при плануванні підземного простору великих міст // Енергетика. Екологія. Людина : Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського. Київ : ІЕЕ, 2021. С. 127–134. *(заочна участь)*

33. **Savchenko I.** Detecting and Handling Flawed Input Data in Modified Morphological Analysis Method // 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 4–7 October, Kyiv, 2022. P. 28–31. (очна участь. Індексується **SCOPUS**)

34. Панкратова Н. Д., **Савченко І. О.** Виявлення і побудова морфологічних таблиць на основі результатів аналізу слабкоструктурованих даних // Інформаційні технології та безпека : Матеріали ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції, вип. 22. Київ : Інжиніринг, 2022. с. 59–61. (очна участь)

35. Pankratova N., **Savchenko I.** Detecting and Constructing Morphological Tables Using Weakly Structured Data Analysis Results // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3503, 2022. P. 42–51. (очна участь. Індексується **SCOPUS**)

Матеріали, що додатково відображають результати дисертації

36. Панкратова Н. Д., **Савченко І. А.** Оценивание многофакторных рисков в стратегии решения задач технологического предвидения. *Инновационное развитие социально-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования* / Под ред. Г. В. Гореловой, Н. Д. Панкратовой. Киев: Наукова думка, 2015. С. 336–344.

37. **Савченко І. А.** Методологическое и математическое обеспечение решения задач предвидения на основе модифицированного метода морфологического анализа. *Инновационное развитие социально-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования* / Под ред. Г. В. Гореловой, Н. Д. Панкратовой. Киев: Наукова думка, 2015. С. 427–441.

38. Панкратова Н. Д., **Савченко І. О.** Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування : навчальний посібник. Київ : Наукова думка, 2015. 245 с.

39. Панкратова Н. Д., Гайко Г. И., Кравец В. Г., **Савченко І. А.** Проблемы системного планирования подземного пространства мегаполисов. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2016. Вып. 2. С.101–107.

40. Гайко Г., Назаренко І., **Савченко І.** Комбінована модель підтримки прийняття рішень щодо пріоритетів розвитку мережі автомобільних тунелів Києва. *Техніка будівництва*. 2024. Вип. 40. С. 53–64. (фахове видання категорії «Б»)

41. **Савченко І. О.** Комп'ютерна програма «Одноетапна процедура модифікованого методу морфологічного аналізу» : Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, Україна. №132163. Заявл. 21.10.2024 р. ; опубл. 18.12.2024 р.

Додаток Б

Дані до порівняння тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва

Таблиця Б.1 – Вхідне оцінювання тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва. Пояснення параметрів і альтернатив дані в п. 6.3.3

Параметр	Альтернативи параметра	Вхідні ненормовані оцінки тунелів							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.1	0,65	0,8	0,65	0,35	0,8	0,65	0,8	0,8
	1.2	0,2	0,2	0,65	0,2	0,65	0,35	0,65	0,65
	1.3	0,2	0,35	0,2	0,2	0,35	0,2	0,35	0,8
	1.4	0,8	0,2	0,8	0,65	0,2	0,2	0,65	0,65
	1.5	0,2	0,2	0,2	0,35	0	0,8	0,2	0
	1.6	0,65	0,65	0,65	0,8	0,2	0,65	0,2	0,2
2	2.1	0,35	0,8	0	0	0,8	0,35	0,35	1
	2.2	0,35	0,65	0,2	0,2	0,65	0,8	1	0
	2.3	0,35	0	0,8	0,8	0	0,2	0,2	0
	2.4	0,8	0	0,2	0,2	0	0	0	0
3	3.1	0,35	0,2	0,35	0,8	0	0,65	0,2	0,2
	3.2	0,8	0,65	0,8	0,65	0,2	0,8	0,2	0,35
	3.3	0,35	0,8	0,35	0,35	0,65	0,35	0,8	0,8
	3.4	0,2	0,35	0,2	0	0,8	0,2	0,8	0,8
4	4.1	0,35	0,35	0,8	0,8	0,2	0,35	0,35	0,8
	4.2	0,8	0,65	0,35	0,35	0,65	0,8	0,65	0,35
	4.3	0,65	0,35	0,2	0,2	0,8	0,35	0,8	0,2
5	5.1	0,2	0,8	0,65	0,8	0,2	0,8	0,2	0,35
	5.2	0,8	0,35	0,8	0,35	0,65	0,35	0,65	0,8
	5.3	0,65	0,2	0,35	0,2	0,8	0,2	0,8	0,65
	5.4	0,35	0,2	0,2	0,2	0,35	0,2	0,35	0,35
6	6.1	0,8	0,8	0,2	0,2	0,8	0,65	0,65	0,65
	6.2	0,65	0,65	0,8	0,8	0,65	0,65	0,8	0,8
	6.3	0,2	0,2	0,65	0,35	0,2	0,2	0,35	0,2
7	7.1	0,2	0,65	0,8	0,8	0,8	0,65	0,2	0,8
	7.2	0,35	0,35	0,65	0,35	0,65	0,8	0,35	0,35
	7.3	0,8	0,2	0	0	0,2	0,2	0,8	0,2
	7.4	0,65	0	0	0	0	0	0,35	0
8	8.1	0,2	0,8	0,8	0,8	0,65	0,8	0,35	0,65
	8.2	0,8	0,35	0,35	0,35	0,65	0,35	0,8	0,65
	8.3	0,65	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0,35	0,2
9	9.1	0,2	0,35	0,8	0,8	0,8	0,2	0,2	0,35
	9.2	0,65	0,65	0,35	0,35	0,2	0,65	0,8	0,8
	9.3	0,8	0,65	0,05	0,05	0	0,8	0,5	0,5
10	10.1	0,35	0,35	0,8	0,8	0,8	0,35	0,35	0,35
	10.2	0,65	0,65	0,35	0,35	0,2	0,8	0,8	0,8
	10.3	0,65	0,65	0,2	0,2	0	0,65	0,5	0,65

Таблиця Б.2 – Нормовані вхідні оцінки і перераховані в результаті першого етапу одноетапного МММА оцінки тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва. Пояснення параметрів і альтернатив дані в п. 6.3.3

Пар.	Альт. пар-ра	Тунель															
		Вх. 1	Рез. 1	Вх. 2	Рез. 2	Вх. 3	Рез. 3	Вх. 4	Рез. 4	Вх. 5	Рез. 5	Вх. 6	Рез. 6	Вх. 7	Рез. 7	Вх. 8	Рез. 8
1.	1.1.	0,241	0,489	0,333	0,619	0,206	0,388	0,137	0,236	0,364	0,466	0,228	0,442	0,281	0,522	0,258	0,391
	1.2.	0,074	0,111	0,083	0,176	0,206	0,193	0,078	0,067	0,295	0,464	0,123	0,193	0,228	0,357	0,210	0,377
	1.3.	0,074	0,064	0,146	0,146	0,063	0,031	0,078	0,029	0,159	0,056	0,070	0,061	0,123	0,057	0,258	0,158
	1.4.	0,296	0,248	0,083	0,034	0,254	0,238	0,255	0,244	0,091	0,013	0,070	0,049	0,228	0,055	0,210	0,072
	1.5.	0,074	0,037	0,083	0,014	0,063	0,082	0,137	0,279	0,000	0,000	0,281	0,209	0,070	0,007	0,000	0,000
	1.6.	0,241	0,052	0,271	0,011	0,206	0,068	0,314	0,146	0,091	0,001	0,228	0,046	0,070	0,002	0,065	0,002
2.	2.1.	0,189	0,282	0,552	0,615	0,000	0,000	0,000	0,000	0,552	0,641	0,226	0,196	0,233	0,290	1,000	1,000
	2.2.	0,189	0,238	0,448	0,385	0,167	0,082	0,167	0,040	0,448	0,359	0,516	0,423	0,633	0,662	0,000	0,000
	2.3.	0,189	0,178	0,000	0,000	0,667	0,766	0,667	0,834	0,000	0,000	0,129	0,287	0,133	0,047	0,000	0,000
	2.4.	0,432	0,302	0,000	0,000	0,167	0,152	0,167	0,126	0,000	0,000	0,129	0,094	0,000	0,000	0,000	0,000
3.	3.1.	0,206	0,128	0,100	0,028	0,206	0,214	0,444	0,539	0,000	0,000	0,325	0,269	0,100	0,014	0,093	0,017
	3.2.	0,471	0,474	0,325	0,252	0,471	0,556	0,361	0,364	0,121	0,044	0,400	0,436	0,100	0,049	0,163	0,100
	3.3.	0,206	0,229	0,400	0,510	0,206	0,154	0,194	0,096	0,394	0,377	0,175	0,192	0,400	0,380	0,372	0,455
	3.4.	0,118	0,169	0,175	0,210	0,118	0,076	0,000	0,000	0,485	0,579	0,100	0,103	0,400	0,557	0,372	0,428
4.	4.1.	0,194	0,163	0,259	0,019	0,593	0,265	0,593	0,294	0,121	0,004	0,233	0,059	0,194	0,022	0,593	0,061
	4.2.	0,444	0,488	0,481	0,417	0,259	0,405	0,259	0,382	0,394	0,255	0,533	0,509	0,361	0,354	0,259	0,439
	4.3.	0,361	0,348	0,259	0,564	0,148	0,330	0,148	0,324	0,485	0,741	0,233	0,432	0,444	0,624	0,148	0,500
5.	5.1.	0,100	0,087	0,516	0,386	0,325	0,492	0,516	0,767	0,100	0,061	0,516	0,565	0,100	0,023	0,163	0,075
	5.2.	0,400	0,503	0,226	0,416	0,400	0,447	0,226	0,206	0,325	0,610	0,226	0,307	0,325	0,333	0,372	0,605
	5.3.	0,325	0,346	0,129	0,155	0,175	0,055	0,129	0,026	0,400	0,300	0,129	0,101	0,400	0,499	0,302	0,282
	5.4.	0,175	0,064	0,129	0,043	0,100	0,006	0,129	0,002	0,175	0,029	0,129	0,027	0,175	0,145	0,163	0,038
6.	6.1.	0,485	0,252	0,485	0,633	0,121	0,340	0,148	0,403	0,485	0,622	0,433	0,539	0,361	0,317	0,394	0,464
	6.2.	0,394	0,465	0,394	0,335	0,485	0,474	0,593	0,514	0,394	0,347	0,433	0,399	0,444	0,531	0,485	0,480
	6.3.	0,121	0,283	0,121	0,032	0,394	0,186	0,259	0,083	0,121	0,031	0,133	0,062	0,194	0,152	0,121	0,056
7.	7.1.	0,100	0,074	0,542	0,385	0,552	0,691	0,696	0,817	0,485	0,555	0,394	0,309	0,118	0,044	0,593	0,420
	7.2.	0,175	0,164	0,292	0,338	0,448	0,309	0,304	0,183	0,394	0,365	0,485	0,541	0,206	0,139	0,259	0,263
	7.3.	0,400	0,522	0,167	0,277	0,000	0,000	0,000	0,000	0,121	0,080	0,121	0,149	0,471	0,649	0,148	0,317
	7.4.	0,325	0,241	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,206	0,168	0,000	0,000
8.	8.1.	0,121	0,209	0,593	0,805	0,593	0,568	0,696	0,653	0,433	0,654	0,593	0,749	0,233	0,415	0,433	0,614
	8.2.	0,485	0,575	0,259	0,173	0,259	0,308	0,304	0,347	0,433	0,328	0,259	0,205	0,533	0,509	0,433	0,361
	8.3.	0,394	0,216	0,148	0,022	0,148	0,124	0,000	0,000	0,133	0,018	0,148	0,046	0,233	0,076	0,133	0,025

Таблица Б.2 (продовження)

9.	9.1.	0,121	0,149	0,212	0,297	0,667	0,674	0,667	0,685	0,800	0,805	0,121	0,182	0,133	0,173	0,212	0,316
	9.2.	0,394	0,576	0,394	0,595	0,292	0,313	0,292	0,303	0,200	0,195	0,394	0,621	0,533	0,738	0,485	0,635
	9.3.	0,485	0,275	0,394	0,108	0,042	0,013	0,042	0,013	0,000	0,000	0,485	0,197	0,333	0,088	0,303	0,049
10.	10.1.	0,212	0,153	0,212	0,362	0,593	0,807	0,593	0,839	0,800	0,839	0,194	0,384	0,212	0,110	0,194	0,291
	10.2.	0,394	0,428	0,394	0,393	0,259	0,153	0,259	0,135	0,200	0,161	0,444	0,416	0,485	0,522	0,444	0,458
	10.3.	0,394	0,418	0,394	0,245	0,148	0,040	0,148	0,026	0,000	0,000	0,361	0,201	0,303	0,367	0,361	0,250

Додаток В

Акти впровадження результатів роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. директора
Навчально-наукового інституту
прикладного системного аналізу
КПІ ім. Ігоря Сікорського
к.т.н., доц.

Костянтин ЄФРЕМОВ



2024 року

АКТ


впровадження результатів дисертаційної роботи
Савченка Іллі Олександровича на тему "Інструментарій освоєння підземного
простору мегаполісів на основі модифікованого методу морфологічного
аналізу"

Науково-методична комісія Навчально-наукового інституту прикладного системного аналізу цим Актом засвідчує, що результати досліджень дисертаційної роботи Савченка Іллі Олександровича на тему "Інструментарій освоєння підземного простору мегаполісів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу" впроваджені у навчальний процес кафедри математичних методів системного аналізу.

Запропоновані Савченком І.О. вдосконалені процедури модифікованого методу морфологічного аналізу, зокрема підхід до використання мереж морфологічних таблиць, математичний апарат оцінювання чутливості методу, використовуються при викладанні навчальної дисципліни «Моделювання складних систем».

Розроблені морфологічні таблиці для оцінювання інженерно-геологічних і структурно-функціональних факторів ділянок підземного будівництва використовуються при викладанні навчальної дисципліни «Основи системного аналізу».

Голова НМКУ
Заст. директора ННІПСА
з науково-педагогічної роботи,
д.т.н., професор

 Віктор РОМАНЕНКО



GEOENGINEERING COMPANY

02105, м. Київ, Дніпровський район, вул. проспект Миру, 4
 Код ЄДРПОУ 44588324
 п/р № UA79305299000026001046812209 в АТ КБ
 «ПРИВАТБАНК»,
 м. Київ, МФО 305299
 Тел.: +38(097) 320-79-77
 geoengua@gmail.com

АКТ

впровадження "Рекомендацій з мінімізації екологічних і техногенних ризиків при плануванні урбаністичного простору м. Києва"

Розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського «Рекомендації з мінімізації екологічних і техногенних ризиків при плануванні урбаністичного простору м. Києва» (затверджені рішенням вченої ради НН ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, протокол №11 від 22.11.2021 р.) впроваджені ТОВ «ГЕОІНЖИНІРІНГ КОМПАНІ» для аналізу впливу інженерно-геологічних та структурно-функціональних факторів на вибір території будівництва низки підземних об'єктів м. Києва, їх вплив на мінімізацію екологічних і техногенних ризиків міста.

В методиці оцінювання цього впливу використовуються, зокрема, наукові результати, отримані доцентом кафедри математичних методів системного аналізу НН ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського Савченком Іллею Олександровичем при підготовці дисертаційної роботи «Інструментарій освоєння підземного простору мегаполісів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу».

Використання запропонованої методики на основі модифікованого методу морфологічного аналізу дозволило системно оцінити потенційний ефект від будівництва відповідних підземних об'єктів, який буде врахований при оцінці пріоритетності їх зведення та прийнятті рішень щодо вибору ділянок (трас) для розміщення об'єктів. Розроблена методика також має потенціал подальшого застосування для оцінювання підземних об'єктів інших типів, що робить її ефективним інструментом планування і управління інвестиціями.

Директор



Юлія МАТВІЙЧУК