

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

САВЧЕНКО ІЛЛЯ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 519.876

**ІНСТРУМЕНТАРІЙ ОСВОЄННЯ ПІДЗЕМНОГО ПРОСТОРУ МЕГАПОЛІСІВ
НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО
АНАЛІЗУ**

01.05.04 – Системний аналіз і теорія оптимальних рішень

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі математичних методів системного аналізу Навчально-наукового інституту прикладного системного аналізу Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Циганок Віталій Володимирович,

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України,
зав. відділом інтелектуальних технологій підтримки
прийняття рішень

доктор технічних наук, професор

Петров Костянтин Едуардович

Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри інформаційних управляючих систем

доктор фізико-математичних наук, професор

Наконечний Олександр Григорович,

Київський національний університет імені Тараса
Шевченка,

професор кафедри системного аналізу та теорії прийняття
рішень

Захист відбудеться «29» квітня 2025 р. о «13:00» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.03 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37, корп. 1, ауд. 05.

Захист транслюватиметься на YouTube-каналі Вченої ради

КПІ ім. Ігоря Сікорського:

<https://www.youtube.com/@vchenaradakpi/streams>

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», за адресою: 03056, м. Київ, проспект Берестейський, 37, та на сайті Вченої ради Університету за адресою: <https://rada.kpi.ua>.

Про дату та місце захисту громадськість проінформовано

«__» _____ 2025 р.

в.о. Вченого секретаря

спеціалізованої вченої ради Д 26.002.03

д.т.н., доц.

Надія НЕДАШКІВСЬКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертаційного дослідження. 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. 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 pp.);
- проект «Ukraine towards Carbon Neutrality (U_CAN)» за грантовою програмою Horizon Europe Framework Programme, Grant Agreement: 101148374.

Мета і завдання дослідження. *Метою дослідження* є розроблення інструментарію планування і прийняття рішень в процесах освоєння підземного простору мегаполісів на основі модифікованого методу морфологічного аналізу (МММА).

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 багатофакторних 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 одержаних результатів. 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».

Особистий внесок здобувача. 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 [1]; розділи 3 і 4, в яких детально описується модифікований метод морфологічного аналізу для задач освоєння підземного простору, і моделі, побудовані на його основі [2]; розробка морфологічної моделі порівняння підземних ділянок [3]; стратегія використання МММА в задачах прогнозування і пом'якшення наслідків соціальних, технічних і природних катастроф [4]; способи експертного оцінювання для формування морфологічних моделей в задачах підземної урбаністики [8]; побудова морфологічної моделі інженерно-геологічних факторів ділянки будівництва [9]; побудова мережі морфологічних таблиць для оцінювання паркінгів [10]; опис ролі і місця МММА в системному підході до підземного будівництва [11]; стратегія оцінювання ризиків у морфологічних моделях для підземного будівництва [12]; розроблення морфологічної моделі впливу небажаних подій для урбаністичних об'єктів [13]; побудова морфологічної моделі оцінювання пріоритетності альтернативних проєктних конфігурацій підземних об'єктів [14]; створення мережі морфологічних таблиць для функціонально-планувальної оптимізації підземного простору мегаполісів [15]; концепція використання МММА для оцінювання невизначеностей і ризиків підземного будівництва [17]; концепція використання МММА для оцінювання перспектив підземного будівництва [18]; використання моделі на основі МММА із залученням розробленого програмного забезпечення для порівняння двох ділянок [19].

Апробація результатів дисертації. 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).

Публікації. Основні результати дисертації викладені у 35 публікаціях, з них 2 монографії [1, 2] (в т.ч. одна англійською мовою, проіндексована в наукометричній б.д. Scopus [2]); 1 розділ у колективній монографії, проіндексований в наукометричній б.д. Scopus [3]; 16 статей у фахових виданнях, включаючи 8 статей у виданнях, що індексуються в наукометричних б.д. Scopus та/або WoS [4, 6, 13, 15–19] (в т.ч. 2 статті у виданнях Q2 [16, 19] і 2 статті у виданнях Q3 [17, 18]), 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) [5, 7–10, 12, 14], 1 стаття у періодичному фаховому закордонному виданні [11]; 16 опублікованих доповідей на всеукраїнських і міжнародних конференціях [20–35] (в т.ч. 5 у виданнях, що індексуються в наукометричних б.д. Scopus та/або WoS [29–31, 33, 35]).

Структура дисертаційної роботи. 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.

Автор висловлює щире 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження; сформульовано мету, яка визначила завдання дослідження; представлено інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами та грантами; наведено наукову новизну отриманих результатів і їх практичне значення, інформацію щодо публікацій і апробації результатів.

У **першому розділі** на основі детального аналізу сучасних наукових джерел наводяться актуальні виклики розвитку мегаполісів, і обґрунтовується освоєння підземного простору як засіб їх вирішення. Розвиток підземної інфраструктури є міждисциплінарною проблемою, і 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 проекти часто виконуються локально, без урахування суспільних потреб і довгострокових наслідків.

Проводиться огляд сучасних підходів і методів сценарного аналізу освоєння підземного простору, які пропонуються для вирішення поставленої проблеми. 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 різноманіттям конфігурацій об'єкту дослідження, викликаним його просторовою і часовою гетерогенністю, наявністю конфліктуючих зацікавлених сторін. Для врахування невизначеностей може бути використаний метод морфологічного аналізу. В рамках кандидатської дисертації було запропоновано модифікацію методу морфологічного аналізу (МММА), 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, і 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.

Однак 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 той час як 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.

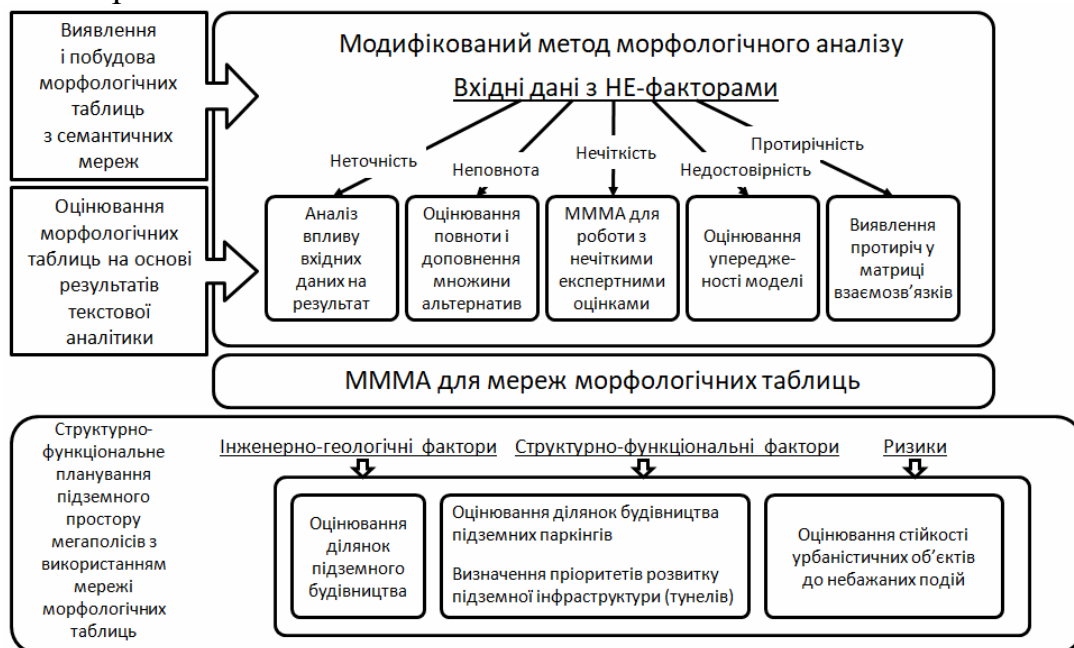


Рисунок 1 – Системний підхід до створення інструментарію освоєння підземного простору

У другому розділі 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. Різні типи невизначеностей, пов'язаних із вхідними даними, розглядаються окремо, і для кожної формулюються спеціальні методи, процедури, прийоми в рамках МММА.

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 (МВЗАП), які визначаються експертами за дискретною шкалою.

Вдосконалено математичний апарат МММА, і показано, що розв'язком системи рівнянь для ймовірностей альтернатив параметрів морфологічної таблиці МТ є:

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

де $\vec{x}_i$ – вектор ймовірностей альтернатив параметрів МТ з урахуванням взаємозв'язків між ними; $\vec{p}_i$ – вектор вхідних (незалежних) ймовірностей альтернатив параметрів МТ; C_{ik} – матриця взаємозв'язків C , помножена за відповідними вимірами на вектори незалежних ймовірностей всіх інших параметрів $p_j, j \in [1; N], j \neq i, j \neq k$.

Це дозволило розробити процедури оцінювання чутливості моделі, тобто визначення допустимих змін вхідних даних, що не призводять до зміни результату.

- Чутливість $\tilde{\delta}_{j_1}^{(1)}$ альтернативи $a_{j_1}^{(1)}$ параметра F_1 відносно зміни незалежної ймовірності $p_{j_2}^{(1)}$ альтернативи $a_{j_2}^{(1)}$ цього ж параметра:

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

- Чутливість альтернативи $a_{j_1}^{(1)}$ параметра F_1 відносно зміни незалежної ймовірності альтернатив іншого параметра (наприклад, 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 альтернативи $a_{j_1}^{(1)}$ параметра F_1 відносно зміни значення матриці взаємозв'язків $c_{1j_1 2k}$:

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

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. Для випадків відсутності оціночної інформації розроблено алгоритм дій (рис. 2).

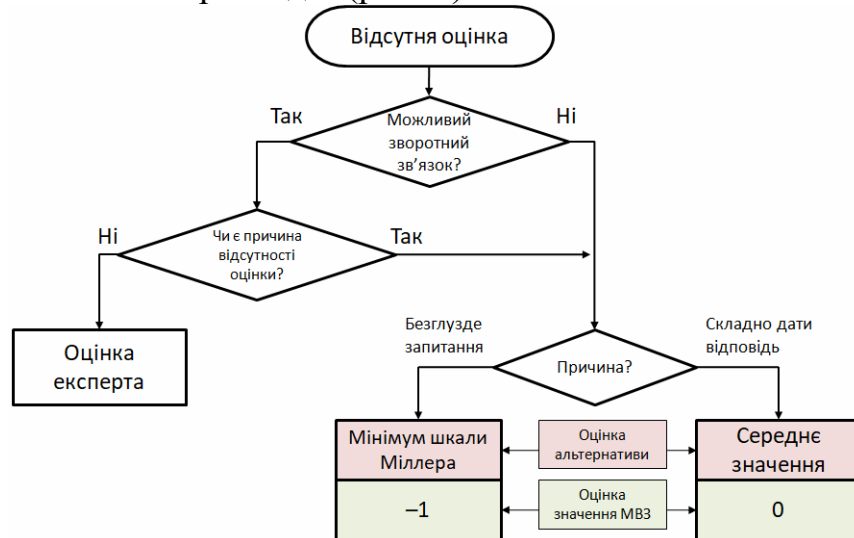


Рисунок 2 – Алгоритм заповнення пропусків в оціночній інформації МММА

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'єкта, запропоновані три способи її оцінювання: рівна частка (ґрунтується на тому, що альтернатива «Інше» повинна отримати таку ж вагу, яку б отримала будь-яка інша альтернатива при відсутності інформації про неї); мінімальна значущість (ґрунтується на міркуванні, що якби альтернативи, що входять до «Інших», мали б більшу вагу, їх варто було б додати до параметра явно); мінімальна ймовірність (допоміжна альтернатива не може мати ймовірність, співрозмірну з оцінками явних альтернатив).

Для визначення повноти множини альтернатив параметра 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. Аномалії, виявлені в результаті аналізу цих зміщень по різних параметрах 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:

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

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.

Розглянемо множину параметрів F^{**} . 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 :

- $\bar{p}_k'' > \bar{p}'' + 1/N_S$. Середня оцінка альтернатив параметра F_k сильно перевищує очікувану, що може свідчити про некоректність оцінювання цього параметра. Потрібне з'ясування причин цієї невідповідності;
- $\bar{p}'' \leq \bar{p}_k'' \leq \bar{p}'' + 1/N_S$. 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;
- $\bar{p}'' - 1/N_S \leq \bar{p}_k'' < \bar{p}''$. 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;
- $\bar{p}_k'' < \bar{p}'' - 1/N_S$. Середня оцінка альтернатив параметра F_k суттєво менше за очікувану. Вірогідно, інформація щодо параметра F_k є неповною, не всі 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 :

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

Протирічність інформації – властивість, що свідчить про наявність кількісних або якісних характеристик, які мають значення або зміст, що протиречить іншим даним. 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.

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. 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. Прийнемо, що відхилення між цими значеннями не повинно перевищувати деякий поріг, який визначається за допомогою $C_{i_1 j_1, i_2 j_2}$:

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

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 заданий поріг, 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 із пороговим;
- 3) якщо співвідношення не виконується, переглянути трійку значень $C_{i_1 j_1, i_2 j_2}$, $C_{i_1 j_1, zk}$, $C_{i_2 j_2, zk}$ на предмет існування логічних протиріч.

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. В ній 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.

Сформулюємо постановку задачі для нечіткого МММА:

Дано:

- морфологічна таблиця, що містить множину характеристичних параметрів $F = \{F_i | i \in \overline{1, N}\}$, кожний параметр F_i описується множиною альтернатив $A_i = \{a_j^{(i)} | j \in \overline{1, n_i}\}$;

- 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 $\{c_{i_1, i_2} \mid i_1, i_2 \in \overline{1, N}; i_1 \neq i_2; j_1 \in \overline{1, n_{i_1}}; j_2 \in \overline{1, n_{i_2}}\}$.

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 $a_j^{(i)}$.

В розв'язанні цієї задачі 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.

Крок 1. Визначення функцій приналежності для нормованих вхідних ймовірностей альтернатив параметрів. Введемо поняття сукупної міри приналежності для вектора ймовірностей альтернатив $\vec{p}^{(i)} = \{p_j^{(i)}\}, j \in [1, n_i]$:

$$M(\vec{p}^{(i)}) = \prod_{j=1}^n \mu_j^{(i)}(p_j^{(i)}).$$

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

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

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

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

В дисертаційній роботі знайдено аналітичне рішення при використанні трикутних функцій належності з екстремальним підходом на цьому кроці, однак в загальному випадку можуть бути застосовані чисельні методи для отримання розв'язку.

Крок 2. 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:

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

де $C_{j_1 j_2 \dots j_N} = \prod_{m=1}^{N-1} \prod_{l=m+1}^N (c_{mj_m, lj_l} + 1)$ – 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. Як і на кроці 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 $\{p_{j_1}'^{(1)}, p_{j_2}'^{(2)}, \dots, p_{j_N}'^{(N)}\}$. 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:

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

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 $p_{j_1}'^{(i_1)} p_{j_2}'^{(i_2)} \dots p_{j_N}'^{(i_N)} = p$. Цю множину позначимо $P_{j_1 \dots j_N}(p)$:

$$P_{j_1 \dots j_N}(p) = \left\{ \vec{p}_{j_1 \dots j_N} \mid p_{j_1}'^{(i_1)} p_{j_2}'^{(i_2)} \dots p_{j_N}'^{(i_N)} = p \right\}.$$

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

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

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

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

або

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

де $C'_{j_1 j_2 \dots j_N} = C_{j_1 j_2 \dots j_N} / \sum_{k_s, s \in [1, N]} C_{k_1, \dots, k_N}$ – нормуючий множник для агрегованого показника матриці взаємозв'язків для конфігурації $\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}$.

Крок 3. 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.

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.

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

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

де $C_{k_1, \dots, k_N}$ розраховується як в стандартній процедурі МММА.

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.

Також для полегшення сприйняття експертами результатів методу розроблено процедуру МММА з відносними оцінками, яка дає змогу більш наглядно

представляти результати розрахунків методу, запобігаючи можливим помилкам і невідповідностям уявленням експертів. Окремо 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.

В **третьому розділі** розглядається інтеграція МММА із методологією сценарного аналізу шляхом отримання вхідних даних на основі етапу попереднього вивчення проблеми в процесі передбачення. 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. 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.

Серед основних причин невизначеності об'єкта МММА можна виділити:

1) відсутність детальної інформації 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) необхідність 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) прийняття рішення щодо вибору конфігурації об'єкта. Принципова відмінність із першим випадком полягає в тому, що невизначеність не спричинюється зовнішніми факторами, тому тільки вибір рішення ОПР є розкриттям цієї невизначеності.

Серед типів опису МТ можна виділити:

- *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.

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. 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) і морфологічну таблицю (табл. 1), побудовану на його основі:

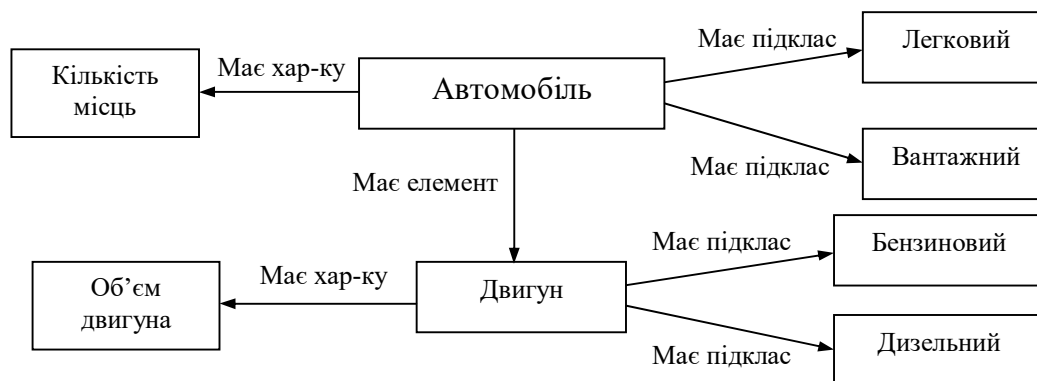


Рисунок 3 – Фрагмент семантичної мережі для об'єкта «Автомобіль»

Таблиця 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.

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.

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

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).

Оцінювання морфологічних таблиць на основі результатів текстової аналітики.

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. 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 $a_j^{(i)}$, оснований 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.

Для оцінювання значень матриці взаємозв'язків пропонується 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.

$$c_{i_1 j_1 i_2 j_2} = r(R_{j_1}^{(i_1)}, R_{j_2}^{(i_2)}) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{text}}} (R_{j_1}^{(i_1)}(g_k) - \overline{R_{j_1}^{(i_1)}})(R_{j_2}^{(i_2)}(g_k) - \overline{R_{j_2}^{(i_2)}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_{\text{text}}} (R_{j_1}^{(i_1)}(g_k) - \overline{R_{j_1}^{(i_1)}})^2 \sum_{k=1}^{N_{\text{text}}} (R_{j_2}^{(i_2)}(g_k) - \overline{R_{j_2}^{(i_2)}})^2}},$$

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:

$$c_{i_1 j_1 i_2 j_2} = 1 - 2 \frac{|\{g_k \mid R_{j_1}^{(i_1)}(g_k) > 0 \wedge R_{j_2}^{(i_2)}(g_k) > 0\}|}{|\{g_k \mid R_{j_1}^{(i_1)}(g_k) > 0 \vee R_{j_2}^{(i_2)}(g_k) > 0\}|}.$$

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.

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. 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; 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; 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 агрегованої таблиці мають ймовірності, розраховані на основі сум ймовірностей конфігурацій менших таблиць.

В найпростішому випадку морфологічні таблиці утворюють ланцюг. Таким ланцюгом можуть стати, наприклад, МТ «подія» – «наслідки» – «рішення». У цьому випадку 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 витоку 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.

Методологія мереж морфологічних таблиць була відпрацьована на задачі моделювання соціальних лих або природних катастроф (рис. 4).

Модель може використовуватись в одному з трьох режимів:

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 автоматизовано 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.

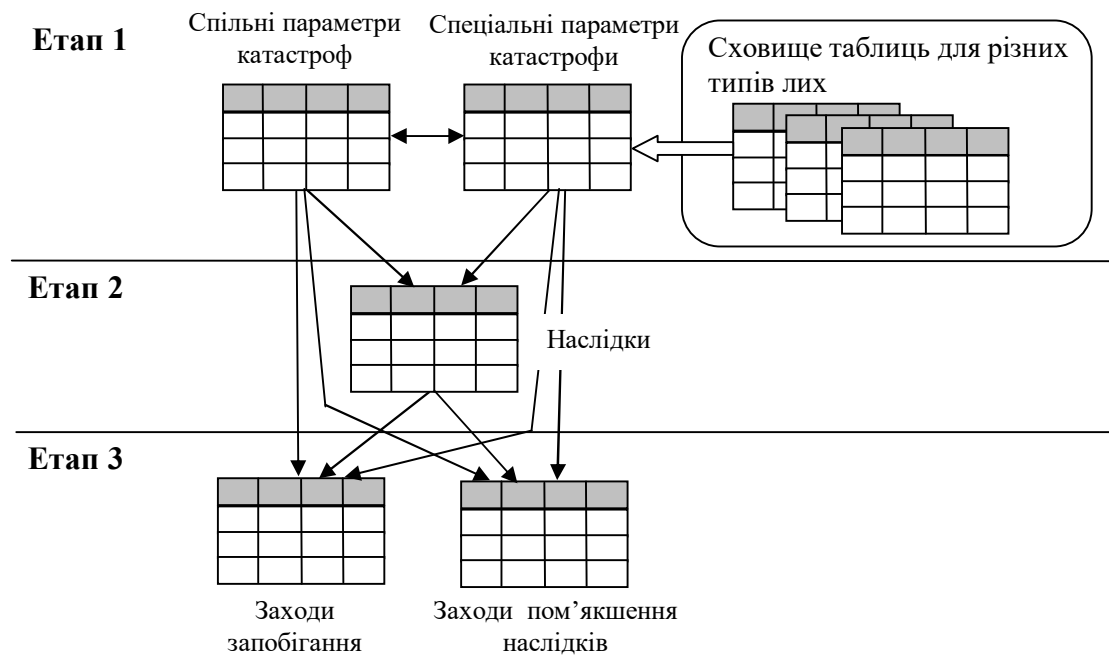


Рисунок 4 – Схема мережі морфологічних таблиць для лих і катастроф

П'ятий розділ присвячено розробленій програмній реалізації модифікованого методу морфологічного аналізу і особливостям роботи з нею. Розроблене програмне забезпечення на базі SAS Studio з користувацькими модулями мовою С#, які відповідають базовим крокам МММА: конструювання МТ; оцінювання МТ; оцінювання МВЗАП; оцінювання матриці зв'язків; розрахунок оцінок альтернатив параметрів для одноетапної та двоетапної процедур морфологічного аналізу; виведення і візуалізація результатів. Приклад взаємодії модулів для розв'язання однієї з практичних задач наведено на рис. 5.

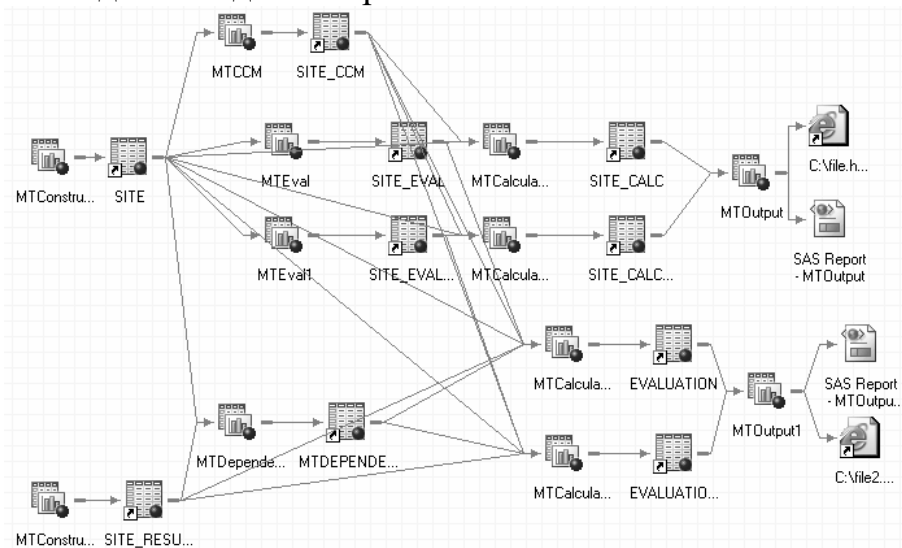


Рисунок 5 – Приклад моделі на основі розроблених модулів

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.

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.

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 узагальнених параметрів і характеристик, які впливають на прийняття рішення щодо ділянки: 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.

У вигляді морфологічної таблиці ці параметри показані в табл. 2.

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*); 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*); 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.

Таблиця 2 – 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 ($K_{сн} < 1$)
	2.2. Помірний ($1 < K_{сн} < 2$)
	2.3. Відносно високий ($2 < K_{сн} < 3,5$)
	2.4. Високий ($K_{сн} > 3,5$)
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. Невивітрілі глини та піски середньої щільності
	5.2. Техногенні відклади (намівні 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- $N_{Іпр}$
	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

В наступній моделі, що розв'язує задачу вибору ділянки для будівництва підземного паркінга, враховується більше характеристик території, оскільки окрім вищезазначених інженерно-геологічних параметрів, 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).

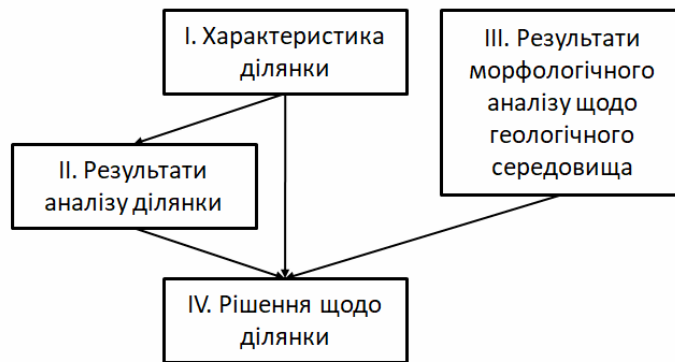


Рисунок 6 – Мережа морфологічних таблиць для оцінювання ділянки з точки зору будівництва паркінга

В таблиці «І. 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; торговельні 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 (*більше 60 км/год; 30–60 км/год; 15–30 км/год; менше 15 км/год*); 5. Існуючі паркомісця (п/м) 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*).

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; маятникова; пікова*).

Таблиця «ІІІ. Результати морфологічного аналізу щодо геологічного середовища» є фрагментом другого етапу оцінювання інженерно-геологічних факторів ділянки, з якого взяті параметри «А. Придатність ділянки», «В. Масштаб об'єкта», «С. Глибина забудови».

Кінцевим результатом роботи моделі є оцінка альтернатив параметрів МТ «ІV. 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*).

Далі розглядалась модель оцінювання пріоритетності побудови автомобільних тунелів, в рамках якої враховувались структурно-функціональні характеристики території, в районі якої проходить тунель. Метою цього завдання було визначення доцільності побудови тунелю, а також різнотипних 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 сформувати чітку групу техногенних і екологічних ризиків, які можна мінімізувати шляхом будівництва тунелів:

Р1. Забруднення повітря (викиди шкідливих вихлопних газів);

P2. Шум і динамічні впливи (гул двигунів, лязгання трамваїв та ін.);

P3. Дорожні затори (зменшення середньої швидкості руху, порушення функції транспорту, підвищенні викиди шкідливих газів);

P4. Дорожні аварії (транспортний колапс, травмування людей);

P5. Протяжність маршруту сполучення;

P6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів.

Обрана група ризиків визначила побудову МТ із 10 параметрів для завдання аналізу структурно-функціональних характеристик території за допомогою МММА для визначення доцільності тунелю і його впливу на мінімізацію різного роду ризиків: 1) тип забудови в районі потенційного тунелю; 2) фактор середмістя; 3) щільність населення; 4) маятниковий рух працівників; 5) щільність магістральної мережі; 6) середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю; 7) наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами; 8) пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю; 9) ступінь критичності об'єкту транспортної інфраструктури; 10) стан вразливості транспортної інфраструктури.

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 P1–P6. В даному випадку аналізується, наскільки той чи інший фактор ризику є важливим для конкретної території.

2) Здатність побудованого тунелю вплинути на мінімізацію відповідних факторів ризику. Аналізується, наскільки для даної території тунель зможе посприяти запобіганню або зменшенню відповідного фактору ризику.

В моделі оцінки небажаних подій, пов'язаних з урбаністичними об'єктами за мету було поставлено аналіз 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.

Аналіз законодавчої бази і нормативних документів дозволив виділити три основних характеристичних параметри небажаних подій, релевантних для цього дослідження: 1) Тип небажаної події (*вибух; пожежа; зсуви, провали та просідання ґрунту; погодні катаклізми; експлуатаційні пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту; порушення функціонування без конструктивних пошкоджень*); 2) Походження небажаної події (*антропогенне зі злим умислом; антропогенне без злого умислу; технічне, технологічне; природне*); 3) Масштаб впливу небажаної події (*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*).

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: А) цілісність об'єкта/його елементів; Б) здатність до функціонування; В) можливість передачі функцій іншим об'єктам; Г) час відновлення функціонування; Д) кількість постраждалих; Е) порушені умови життєдіяльності; Ж) розмір матеріальних збитків; З) екологічні наслідки.

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.

Як узагальнення попередніх моделей, була побудована мережа морфологічних таблиць для оцінювання потенціалу території підземного будівництва, яка синтезує функціонально-планувальну організацію міського простору та інженерно-геологічні фактори геологічного середовища для територій, що розглядаються (рис. 7).



Рисунок 7 – Мережа морфологічних таблиць оцінювання потенціалу територій підземного будівництва

В цьому розділі розроблені моделі використовуються для оцінювання і надання підтримки прийняття рішень щодо підземного будівництва в містах України.

Модель оцінювання інженерно-геологічних факторів (підрозділ 6.2) ділянок будівництва була використана для чотирьох ділянок м. Києва з різними характеристиками: будівельний майданчик на проспекті Перемоги; будівельний майданчик між вулицями Бульварно-Кудрявська та Гончара; ділянка під Європейською площею; ділянка між Софійською та Михайлівською площами.

Результати другого етапу двоетапної процедури МММА наведені у табл. 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.

Таблиця 3 – 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	B.1. Площа перерізу до 10 м ²	0,722	0,454	0,401	0,207
	B.2. Площа перерізу до 35 м ²	0,241	0,303	0,297	0,312
	B.3. Площа перерізу до 70 м ²	0,033	0,201	0,174	0,307
	B.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
Е. 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

З використанням моделі для оцінювання ділянок підземних паркінгів, був додатково проведений аналіз структурно-функціональних факторів для ділянок 1 і 2 із попередньої задачі, і розраховані оцінки рішень щодо цих ділянок (табл. 4).

Таблиця 4 – Оцінена морфологічна таблиця «IV. Рішення щодо ділянки»

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Ділянка 1	Ділянка 2
А. Доцільність будівництва паркінгу	A.1. Будівництво доцільне	0,853	0,979
	A.2. Будівництво недоцільне	0,147	0,021
В. Доцільний розмір паркінгу	B.1. До 50 п/м	0,429	0,355
	B.2. 50...200 п/м	0,444	0,456
	B.3. 200...400 п/м	0,121	0,160
	B.4. Більше 400 п/м	0,007	0,028

На основі табл. 4 можна зробити висновок, що обидві ділянки є достатньо сприятливими для будівництва (альтернатива «A.1. Будівництво доцільне» суттєво випереджає «A.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 попередній задачі, її результуюча оцінка виявилась дещо нижче, і крім того, модель рекомендує для неї менші розміри паркінгу, оскільки менші перерізи підземних споруд сприяють їх стійкості.

За допомогою розробленої моделі оцінювання трас потенційних автомобільних тунелів було здійснено оцінювання і порівняння всіх восьми автомобільних тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва (рис. 8).



Рисунок 8 – Трасування автомобільних тунелів у Генеральному плані м. Київ

Для цієї задачі також було розроблено комбінований метод на основі методу аналізу ієрархій і МММА, що дозволило 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 визначених факторів у моделі МММА була побудована трирівнева ієрархія, як показано на рис. 9.

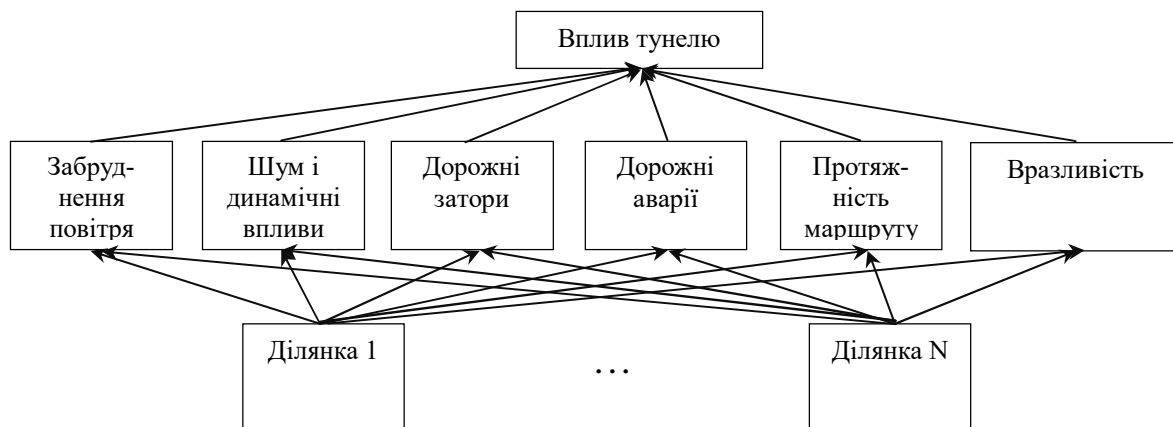


Рисунок 9 – Ієрархія факторів впливу тунелю

Для розрахунку вагових коефіцієнтів ділянок відносно факторів ризику в ієрархічній моделі були використані результати МММА, а для оцінювання факторів ризику були запропоновані два підходи:

- 1) використання в якості ваги оцінки важливості відповідного фактору ризику, отриманої в результаті двоетапного МММА;
- 2) використання окремого експертного оцінювання для порівняння критеріїв, і визначення ваг на основі методів обробки матриць парних порівнянь.

Отримані за допомогою обох підходів оцінки ділянок, а також відповідні ранжування, наведені в табл. 5 (у другому підході розглянуто три альтернативні варіанти – пріоритет безпеки; пріоритет екології та кліматичної нейтральності; пріоритет ефективності транспортної системи). Також для порівняння наведене ранжування, отримане за допомогою МММА.

Таблиця 5 – 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

Аналіз результатів 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. У разі визначення пріоритетної ролі кліматичного (екологічного) фактору найбільший рейтинг отримують тунелі 5, 7 і 8. 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.

Модель оцінювання структурно-функціональних факторів, пов'язаних із підземним будівництвом, була використана також для системної порівняльної оцінки переваг та ризиків двох альтернативних маршрутів (кінцевих станцій) Одеського метрополітену (рис. 10), передбачених генеральним планом м. Одеса.

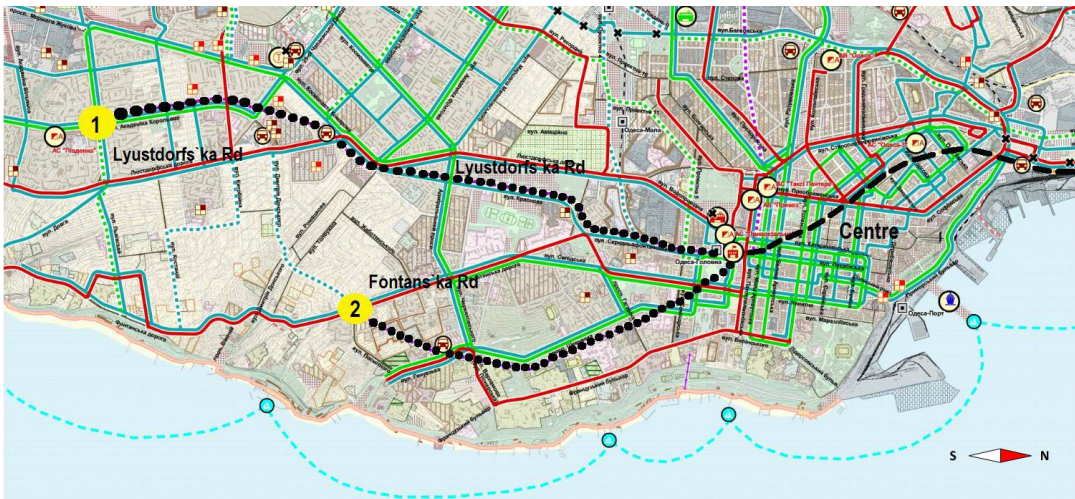


Рисунок 10 – Альтернативні шляхи і кінцеві станції метрополітену м. Одеса

На другому етапі МММА були оцінені 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 зручності результати моделювання представлені за допомогою узагальнюючого коефіцієнту w_{ratio} , більші значення якого свідчать про більш значний потенційний вплив вибору ділянки на відповідний фактор (рис. 11).

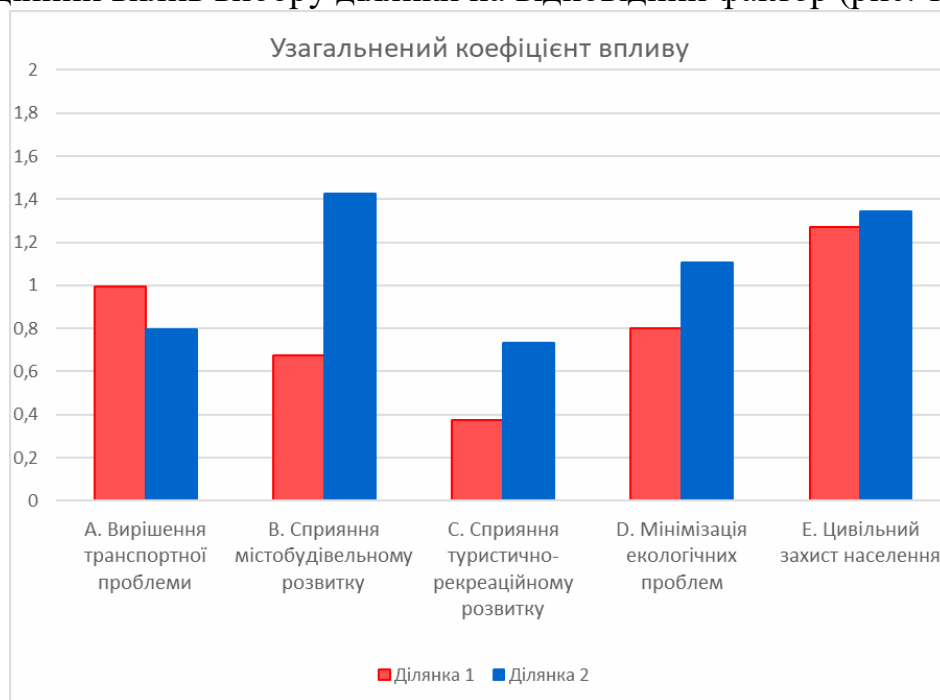


Рисунок 11 – Коефіцієнт впливу w_{ratio} обох ділянок для різних факторів

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, 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.

Модель оцінювання наслідків небажаних подій для урбаністичних об'єктів була використана для об'єктів критичної міської інфраструктури, а саме комплексу трубних, і тунельного каналізаційних дюкерів, прокладених по дну Дніпра. Був розглянутий як весь комплекс можливих небажаних подій, так і конкретні сценарії (військово-диверсійна загроза; техногенна загроза; природна загроза). Найбільш релевантні параметри наслідків для сценарію військово-диверсійної загрози показані на рис. 12.

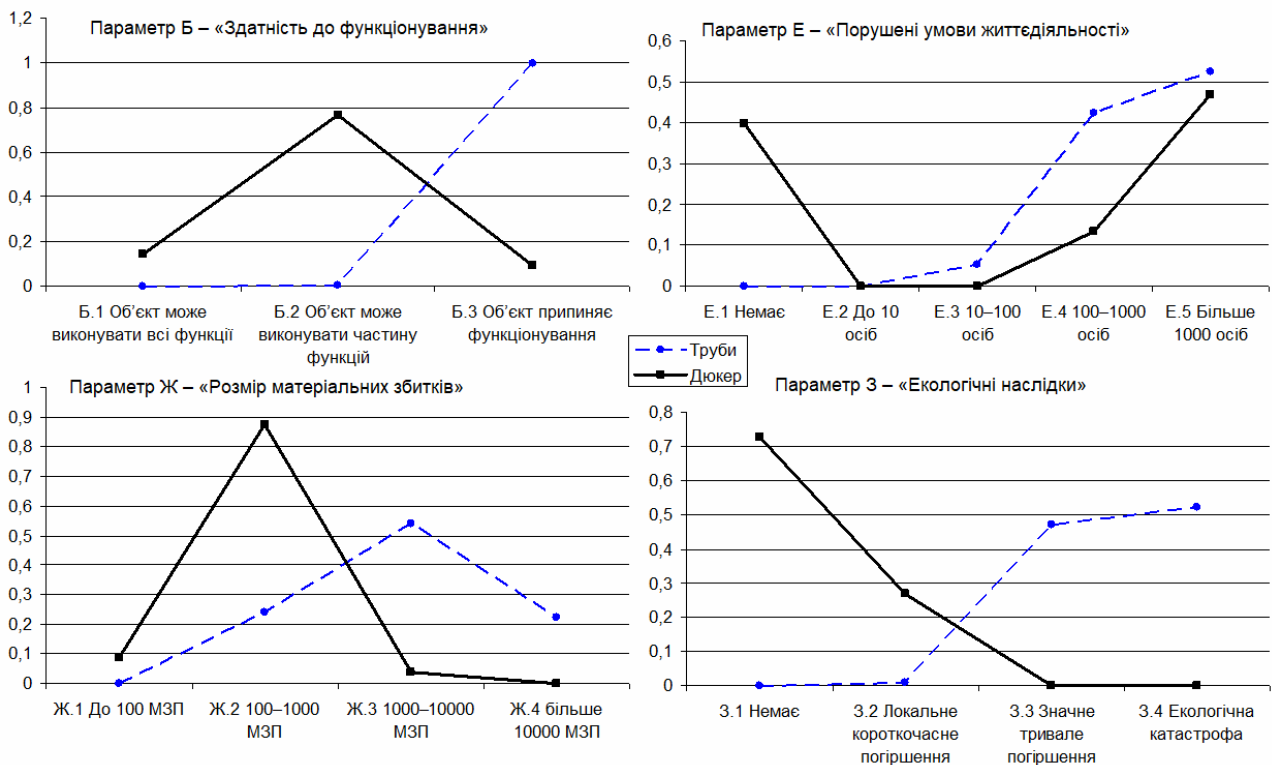


Рисунок 12 – Порівняння комплексу трубних, і тунельного каналізаційних дюкерів з точки зору наслідків небажаної події за сценарієм військово-диверсійної загрози

Діаграми дозволяють наглядно співвіднести й оцінити ймовірності сценаріїв щодо обраної групи критеріїв для трубного та тунельного дюкерів. 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 дюкеру щодо стабільності в умовах військовий (диверсійних) загроз, показують доцільність переведення розглянутої ділянки міської інфраструктури в підземний простір.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження і одержані результати дозволяють зробити висновок, що вирішена проблема створення системної методології освоєння підземного простору мегаполісів з урахуванням невизначеностей, багатofакторних 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 напіваавтоматизованого 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 С#, 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. Формат розробленого програмного забезпечення дозволяє компоувати 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, ризику, 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 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.

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.

Рекомендується подальше використання розробленого 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 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. *Geomining: 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., Bidiuk P. I., Selin Y. M., **Savchenko I. O.**, Malafeeva L. Y., Makukha M. P., Savastyanov 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 І. 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 І. А.**, Гайко Г. І., 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 І. О.**, Гайко Г. І., 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. 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. (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. *Naukovyi 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. **Шибишин 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. Індукується 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 XXII 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. І., 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» : Свідectво про реєстрацію авторського права на твір, Україна. №132163. Заявл. 21.10.2024 р. ; опубл. 18.12.2024 р.

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, ризики, 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 ОПП.

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 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.

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.