УДК 551:509:519.6:517.9:577.4:681.3.02:624.19:303.732.4
№ держреєстрації 0120U104941, 0121U111131
Інв.№

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(КПІ ім. Ігоря Сікорського)

03056, м.Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 35. Тел./факс 204-8447

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи

Віталій ПАСІЧНИК

13.12.2021

З В І Т
про науково-дослідну роботу
за договорами № 109/01.2020 від 30.10.2020,
№ 114/01/0247 від 30.04.2021

ІНСТРУМЕНТАРІЙ ПЛАНУВАННЯ ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ВЕЛИКИХ МІСТ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ І ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ УРБАНІСТИЧНОГО ПРОСТОРУ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ

грантова підтримка Наукового фонду досліджень України
у межах конкурсу «Наука для безпеки та суспільства»

(заключний)

Науковий керівник
д.т.н., професор
чл.кор. НАНУ

Наталія ПАНКРАТОВА

2021

Рукопис закінчено 6.12.2021 р.
Результати цієї роботи розглянуто Вченою Радою КПІ ім. Ігоря Сікорського, протокол №10 від 13.12.2021

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник Д.т.н., проф.	Наталія ПАНКРАТОВА (вступ, підрозд. 1.1, 1.6, 1.7, 2.4, 2.5, 2.7, 3.4, висновки) Матеріали представлено 6.12.2021
Д.т.н., проф.	Геннадій ГАЙКО (вступ, підрозд. 1.2, 1.3, 2.1, 2.3, 2.8, 3.2–3.3, 3.5, 3.6, висновки) Матеріали представлено 6.12.2021
Н.с., д.т.н.	Надія НЕДАШКІВСЬКА (підрозд. 1.4) Матеріали представлено 9.12.2020
С.н.с., к.т.н.	Олексій МАЛИШЕВСЬКИЙ (підрозд. 2.2) Матеріали представлено 6.12.2021
Н.с., к.т.н.	Ілля САВЧЕНКО (підрозд. 1.3, 2.3, 3.1–3.3, 3.5) Матеріали представлено 6.12.2021
М.н.с., к.т.н.	Володимир ПАНКРАТОВ (підрозд. 1.6, 1.7, 2.4, 2.5) Матеріали представлено 6.12.2021
М.н.с.	Володимир САВАСТЬЯНОВ (підрозд. 1.5, 2.6) Матеріали представлено 6.12.2021
Студент	Данило МУСІЄНКО (підрозд. 1.7, 3.4) Матеріали представлено 6.12.2021

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 257 с., містить 3 розділи; 109 рис., 44 табл., 98 джерел.

Об′єкт дослідження – процеси підземної інфраструктури великих міст.

Предмет дослідження – моделі, методи, підходи щодо планування використання підземного простору великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків.

Мета роботи – розробка інструментарію планування підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору на основі системної методології (на прикладі м. Києва).

Методи дослідження: системна методологія, що включає модифікований метод морфологічного аналізу, сценарний аналіз, фрактальний аналіз, методологію імпульсного когнітивного моделювання та їх адаптацію до урбаністичних проблем а також методи територіального планування та інженерної геології.

Результати та їх новизна: виділено об’єкти, які мають вагомий вплив на зменшення екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору; проаналізовані можливі критичні ситуації і фактори природного, техногенного та терористичного характеру, які можуть становити певну небезпеку для міської інфраструктури; вперше створена морфологічна модель для оцінки небажаних подій та їх наслідків для урбаністичних об’єктів, на основі якої проведено усебічне системне тестування об’єктів критичної інфраструктури; проведена системна оцінка пріоритетності будівництва підземних об’єктів; проведено імпульсне когнітивне моделювання щодо розробки сценаріїв планування підземного будівництва.

Ключові слова: ЕКОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНОГЕННІ РИЗИКИ, УРБАНІСТИЧНИЙ ПРОСТІР, ПІДЗЕМНА ІНФРАСТРУКТУРА, СИСТЕМНА МЕТОДОЛОГІЯ, МОРФОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ, СИСТЕМНА СТРАТЕГІЯ, КОГНІТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, СЦЕНАРНИЙ АНАЛІЗ.

ABSTRACT

Report SRW: 257 p., there are: 3 chapters, 109 draw., 44 tables, 98 sources.

Research object – processes in underground infrastructure of large cities.

Purpose of work – developing tools for planning underground infrastructure of large cities for minimization of ecological and technogenic risks in urban space using system methodology (on the example of Kyiv city).

Research methods – system methodology involving modified morphological analysis method, scenario analysis, fractal analysis, impulse cognitive modeling methodology and their adaptations to urban problems; territorial planning and engineering geology methods.

Results and novelty:

The objects that bear the most impact at reducing ecological and technogenic risks were highlighted; possible critical situations and factors of natural, technogenic and terrorist origin that might pose a certain threat to urban infrastructure, were analyzed; for the first time a morphological model is created for assessing undesired events and their consequences for urban objects; this model was utilized for comprehensive systemic testing of critical infrastructure objects; a systemic evaluation of underground object construction priorities was conducted; impulse cognitive modeling regarding the development of underground construction planning scenarios was conducted.

Keywords: ECOLOGICAL AND TECHNOGENICRISKS, URBAN SPACE, UNDERGROUND INFRASTRUCTURE, SYSTEM METHODOLOGY, MORPHOLOGICAL MODEL, SYSTEM STRATEGY, COGNITIVE MODELING, FRACTAL ANALYSIS, SCENARIO ANALYSIS.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ 8

1 ФОРМАЛІЗАЦІЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ І СИСТЕМНИХ ЗВ'ЯЗКІВ РОЗВИТКУ УРБАНІСТИЧНОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ І ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ 17

1.1 Побудова концепції системного підходу до моделювання і сценарного аналізу планування розвитку інфраструктури мегаполісу в умовах екологічних, техногенних і терористичних загроз, що базується на спільному застосуванні методологій передбачення, когнітивного моделювання та фрактального аналізу 17

1.2 Актуальність і постановка задачі розвитку урбаністичного простору 27

1.3 Побудова морфологічної моделі розвитку підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору 31

1.4 Застосування методу BOCR до оцінювання моделей розвитку підземної інфраструктури з урахуванням ризиків 41

1.4.1 Мережа підтримки прийняття рішень для оцінювання пріоритетності моделей розвитку підземної інфраструктури міста Києва 42

1.4.2 Метод BOCR для оцінювання альтернатив тунелів з урахуванням ризиків 44

1.4.3 Приклад застосування методу BOCR до оцінювання альтернатив тунелів у місті Києві 46

1.5 Ідентифікація структурно-функціональних, інженерно-геологічних і техногенних факторів міського середовища в системі наземної та підземної урбаністики та їх зв'язків з групами екологічних і техногенних ризиків методами текстової аналітики з публічних та спеціалізованих джерел 52
1.6 Розробка моделі когнітивного моделювання щодо побудови сценаріїв планування розвитку підземної інфраструктури 57
1.7 Побудова обчислювального алгоритму когнітивного моделювання 65
1.8 Розробка сценаріїв мінімізації ризиків урбаністичних територій при створенні підземної інфраструктури 70
2 СИСТЕМНІ СТРАТЕГІЇ ВИКОРИСТАННЯ ПІДЗЕМНОГО ПРОСТОРУ 81
2.1 Об’єкти мережевих моделей підземної інфраструктури 81
2.2 Аналіз прокладання транспортних тунелів м. Києва з використанням фрактального аналізу. 85
2.3 Морфологічне моделювання небажаних подій та їх наслідків для урбаністичних об’єктів 98
2.4 Аналіз структур когнітивних моделей складних систем при динамічних навантаженнях щодо планування раціональних конфігурацій підземного простору 105
2.5 Структурні властивості когнітивної карти складної системи на основі симпліціального аналізу 109
2.6 Застосування інструментів текстової аналітики для збору і класифікації інформації щодо використання підземного простору 120
2.7 Когнітивне моделювання підземного будівництва 133
2.8 Системні стратегії використання підземного простору на прикладі міста Києва 147

3 СИСТЕМНІ КОНЦЕПТИ ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ КРИТИЧНИМ РИЗИКАМ 163
3.1 Побудова і тестування моделі модифікованим методом морфологічного аналізу 163
3.1.1 Процедура побудови моделі в модифікованому методі морфологічного аналізу 163
3.1.2 Використання розробленої моделі для оцінювання ділянок потенційного будівництва тунелів 166
3.1.3 Експеримент зі штучним підвищенням ймовірності пливуна в моделі 170
3.1.4 Результати тестування альтернативних ділянок потенційного будівництва тунелів 171
3.2 Побудова і оцінювання морфологічної моделі критичної ділянки міської інфраструктури 181
3.3 Сценарний аналіз використання підземного простору м. Києва при військових (диверсійних) загрозах, техногенних і природних надзвичайних ситуаціях 189
3.4 Імпульсне когнітивне моделювання планування раціональних конфігурацій підземного простору в умовах екологічних і техногенних ризиків великих міст 198
3.5 Обгрунтування системного концепту тунельного переходу 218
3.6 Концепти дюкерів під Дніпром 226
Висновки 233
Перелік посилань 242
Перелік наукових праць, виданих за темою дослідження 253

ВСТУП

Однією з характерних рис сучасного світу є зростання мегаполісів, розширення інфраструктури та зростання їх населення, що призводить до різкого скорочення кількості неосвоєних міських територій. У свою чергу це веде до пошуку нових місць для розміщення виробничих, соціальних та інших об'єктів людської діяльності. Рішення широкого кола соціально-економічних, архітектурно-планувальних та екологічних завдань мегаполісів невіддільне не тільки від раціонального використання наземних міських територій, а й від планомірного і комплексного освоєння підземного простору міст, де доцільно розміщувати споруди різного призначення. Створюваний людиною в процесі підземного будівництва простір мегаполісів стає новим, підземним середовищем проживання, яке повинно бути комфортним і безпечним для людини. Але проблема освоєння підземних територій є набагато ширшою підземного містобудування.

Регулювання міського розвитку з метою підвищення екологічних стандартів і безпеки життєдіяльності в постійно зростаючих мегаполісах є однією з найбільш актуальних і водночас недостатньо досліджених та складних для розв’язання світових проблем [1]. Найбільш характерними загрозами міського середовища є забруднення повітря викидами автомобільного транспорту, динамічні та шумові прояви, негативні впливи промислових зон, сховищ відходів і сміття, прориви в системах каналізації, водо- та енергопостачання, перевантаженість очисних споруд, транспортні аварії та дорожні затори, зсувні явища та інші небезпечні процеси геологічного середовища, що привертає постійну увагу дослідників та екологічних організацій [2, 3]. Кожне велике місто має об’єкти критичних екологічних і техногенних загроз. Приміром, для м. Києва автомобільні затори магістралей середмістя й мостів через Дніпро породжують низку транспортних і

екологічних проблем, системне вирішення яких можливе лише шляхом будівництва автомобільних тунелів.

Світові концепти екологізації міського середовища значну увагу приділяють можливостям підземного простору взяти на себе функції найбільш небезпечних та ризикованих поверхневих об’єктів і комунікацій, забезпечуючи мінімізацію екологічних та техногенних ризиків великих міст [4–6]. Проблема освоєння підземного простору великих міст пов’язана з розповсюдженою тенденцією будівництва окремих підземних споруд як локальних об’єктів, які виступають лише паліативним рішенням складних комплексних задач. Парадигма сталого розвитку змінює масштаб інженерних проектів і передбачає розгляд їх в межах значно більшої природно-технічної та соціальної системи, що потребує системної методології розвитку підземної інфраструктури міста для мінімізації екологічних і техногенних ризиків.

Слід зазначити, що навіть вдалий план територіального розвитку конкретного «підземного міста», приміром у м. Гельсінкі це понад 400 пов’язаних підземних об’єктів [7], складно застосувати в умовах іншого урбаністичного простору, відмінного геологічного середовища та вже сформованої специфічної підземної інфраструктури, на яку треба спиратися, що потребує створення універсального системного інструментарію для планування підземного простору. Окремі праці, спрямовані на розгляд системних підходів при розвитку підземного будівництва не йшли далі загальних рекомендацій та постановки задач системних досліджень і не були зосереджені на проблемах екології та безпеки суспільства в мегаполісах [8].

Сучасний розвиток методології прикладного системного аналізу, зокрема модифіковані авторами проекту методи морфологічного аналізу, мережеві методи аналізу ієрархій, фрактальний аналіз, когнітивне моделювання та їх адаптація до урбаністичних проблем [9–11] відкриває нові перспективи для планування

підземної інфраструктури великих міст, які вперше будуть представлені як системи екологізованих проєктних конфігурацій.

Підземне містобудування є складною системою в багатьох аспектах. По-перше, ця система складається з багатьох взаємопов'язаних підсистем і об'єктів. По-друге, процеси, що протікають в цій системі і при будівництві, і при функціонуванні, також складні і в деяких випадках погано передбачувані, бо у великій мірі пов'язані з різними геологічними процесами. Це відноситься і до досліджуваних в даній роботі підземних об'єктах столиці України – 8 автомобільних підземних тунелів різного типу і призначення, 3 з яких планується провести під Дніпром, запропоновані авторами тунельний дюкер під Дніпром для перепуску стічних вод з правобережного Києва до Бортницької станції аерації, тунельний перехід Дніпра кільцевою магістраллю в районі м. Українка, підземна автомагістраль під Набережно-Хрещатицькою вулицею від Поштової площі до Церкви Миколи Чудотворця.

Існуюча методологія дослідження, проектування і будівництва підземних споруд як в частині архітектурно-планувальних рішень, так і в частині безпечного ведення підземних робіт, потребує подальшого вдосконалення. У будь-якому випадку, ця методологія повинна інтегрувати різні наукові розділи і напрямки, повинна бути міждисциплінарної. Проблеми, які супроводжують підземне містобудування, можна віднести до слабкоструктурованих проблем, що потребує при її дослідження залучення текстової аналітики. В даний час структура науки будівельної геотехнології представлена чотирма основними розділами: підземна урбаністика, механіка підземних споруд, геоніка і управління станом гірських порід при будівництві. Для проведення досліджень в галузі підземного будівництва представляють інтерес зміст всіх розділів. Так, змістом одного з напрямків першого розділу є обгрунтування стратегії і методів освоєння підземного простору, що є також і одним із завдань передбачення і когнітивного моделювання складних систем. На етапі проектування підземних споруд

необхідно розглянути і обґрунтувати соціально-економічну доцільність і технічну можливість будівництва підземних споруд в гірничо-геологічних умовах і в умовах впливу технології будівельних робіт, функціонального призначення підземних будівельних об'єктів; завдання обґрунтування доцільності, можливості, ефективності дій в складних системах також входять в область завдань передбачення і когнітивного моделювання. Знання і дані з інших наукових розділів будівельної геотехнології також можуть бути корисні при оцінюванні та моделюванні структури і поведінки системи, що імітують реальну систему з позицій поставленої мети дослідження і функціонування. Так, оцінка стійкості гірничих виробок; дослідження процесів взаємодії інженерних конструкцій з породними масивами і встановлення якісних і кількісних характеристик їх напружено-деформованого стану та ін. (другий розділ) може представити дані і отримати нові знання про них після когнітивного моделювання при аналізі властивостей когнітивної моделі; третій розділ, Геоніка, що включає дослідження «взаємозв'язків елементів технології гірничо-будівельних робіт, встановлення якісних і кількісних параметрів, що визначають вибір способів, техніки і технології будівництва; ефективних методів організації праці та управління роботами з будівництва ...» виявляються необхідними при розробці когнітивної моделі, встановлення відносин між її об'єктами (або «концептами», «чинниками», «сутностями»), які є також концептами (поняттями), пов'язаними з підземним будівництвом.

На нашу думку, проведення робіт із залученням методології передбачення, зокрема, модифікованого методу морфологічного аналізу, когнітивного моделювання, текстової аналітики, фрактального аналізу особливо на стадії проектних робіт з освоєння підземного простору, вкрай необхідно. Серйозною причиною для цього може послужити те, що необхідно передбачити і заздалегідь виключати або знижувати ризики, які неминуче притаманні до підземного будівництва. Знання про ризики необхідні всім – і проектувальникам, і

будівельникам, і експлуатаційникам. Була запропонована класифікація ризиків, що складається з 8 груп: будівельні, екологічні, управлінські та виконавські, комерційні, економічні, контрактні, соціальні та експлуатаційні. Класифікація дає основу для подальшої розробки екологічно безпечних технологій і способів будівництва. Будівельний ризик є домінуючим за впливом на весь життєвий цикл підземної споруди і він тим вище, ніж «нижче вимоги до кваліфікації персоналу, якості і термінів будівництва, надійності гірничопрохідницького устаткування і ін. Неправильні будівельні рішення є базою для виникнення екологічних, економічних, експлуатаційних і ін. ризиків». Тому основним принципом, закладеним в дослідження щодо вдосконалення методів проектування і будівництва підземних об'єктів, є принцип мінімізації збитку від наслідків негативних проявів ризиків з урахуванням взаємодії і взаємовпливу всіх природних, технічних, технологічних та інших факторів. Можливість катастроф, викликаних не тільки непередбачуваними природними ситуаціями, але і помилками проектування, недосконалістю існуючих технологій, вимагають постановки і вирішення проблеми життєстійкості об'єкта в екстремальних і надзвичайних ситуаціях.

Все вищевказане обґрунтовує актуальність досліджень, що виконуються, та дозволяє запропонувати методологію передбачення і когнітивного моделювання складних систем, фрактального аналізу та текстової аналітики як складових інструментарію планування підземної інфраструктурі великих міст для забезпечення мінімізації екологічних и техногенних ризиків урбаністичного простору.

У розділі 1 розглядається постановка проблеми формалізації факторів впливу і системних зв’язків розвитку урбаністичного простору для мінімізації екологічних і техногенних ризиків, пропонується концепція системного підходу до моделювання і сценарного аналізу планування розвитку інфраструктури мегаполісу в умовах екологічних, техногенних і терористичних загроз, що

базується на спільному застосуванні методологій передбачення та когнітивного моделювання, наводиться побудова моделей для різних аспектів задачі методами модифікованого морфологічного аналізу, аналізу ієрархій та мереж, аналітики слабкоструктурованих даних.

У розділі 2 наведеного звіту розглядаються системні стратегії використання підземного простору (на прикладі міста Києва) з метою мінімізації екологічних і техногенних ризиків столиці. Для вирішення цієї проблеми виникає нагальна потреба у створенні стратегічного майстер-плану освоєння підземного простору міста Києва (до 2040 р.) і більш конкретних планів ближчої перспективи. Він мусить забезпечити стратегію, яка на узагальненому рівні розкриє можливі сценарії розвитку підземної урбаністики у відповідності з планами розвитку міста на найближчі десятиріччя, а також визначить пріоритетні території для конкретних дій і задасть необхідні параметри для швидкого й екологічного освоєння цих територій. Майстер-план не є жорсткою програмою, а являє собою набір стратегій, принципів і концептів, які допоможуть управлінню розвитком міста забезпечити привабливі пропозиції інвесторам, відкриють нові можливості суспільним організаціям та науково-освітній спільноті впливати на містобудівну політику. Наводяться плани щодо модернізації існуючих та майбутніх нових ліній Київського метрополітену. Освоєння підземного простору мегаполісів свідчить про значні перспективи будівництва систем автомобільних тунелів. Вельми перспективною, на думку авторів, є ідея спорудження автомобільного тунелю під вулицею Хрещатик (нижче підземних торгівельних комплексів), що дозволить зробити головну вулицю столиці пішохідною, значно скоротить викиди вихлопних газів у центрі міста. Ще одна авторська пропозиція стосується переведення існуючого автомобільного потоку в підземний тунель на ділянці вулиці Набережно-Хрещатицька від Річкового вокзалу (Поштової площі) до церкви Миколи Чудотворця (або до Гаванського мосту). Найбільш перспективним

для тунельного будівництва може стати південний перехід кільцевої дороги навколо Києва в районі м. Українка.

Наведено розроблені мережеві моделі підземної інфраструктури для сталого розвитку мегаполісу. Згідно з основною ідеєю проєкту, а саме – переведення в підземний простір найбільш вразливих або екологічно загрозливих ділянок інфраструктурних мереж, розглядаються об’єкти (на прикладі м. Києва), які покладені в основу мережевих моделей, це тунелі різного типу та призначення. Складність транспортних тунелів м. Києва, як саме об’єктів так і районів їх розташування, досліджується з залученням фрактального аналізу в умовах екологічних і техногенних ризиків великих міст.

Наведена морфологічна модель небажаних подій та їх наслідків для урбаністичних 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). Для моделювання залучено двоетапний модифікований метод морфологічного аналізу, в якому на першому етапі описується множина потенційних небажаних подій, а на другому етапі аналізуються наслідки цих подій у різних аспектах для об’єкта дослідження. На основі створеної морфологічної моделі розроблено опитувальні форми щодо порівняння концепту підземного дюкера під Дніпром до Бортницької станції аерації із існуючою системою каналізаційних труб по дну Дніпра.

На основі текстової аналітики виконано збір джерел, що є невід’ємною частиною будь-якого сучасного аналітичного дослідження. Беззаперечно, основним джерелом інформації про об’єкти інфраструктури є «Генеральний план м. Києва до 2025 р.» та інші офіційні документи, проте різноманіття зв’язків таких об’єктів із різноманітними ситуаціями може бути накоплена з новин та публікацій спеціалізованих та загальних джерел, та з окремих публікацій, присвячених цій тематиці. Отримана інформація використовується як вихідна у якісних моделях передбачення та когнітивному моделюванню.

Для оцінювання сценаріїв при динамічних навантаженнях залучається імпульсне когнітивне моделювання. Метою таких когнітивних досліджень є розуміння, пояснення, формальне подання складної системи (на основі структуризації наявних теоретичних, практичних знань, статистичних та експертних даних) і породження нових знань про систему, що необхідно для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Наводиться аналіз структур когнітивних моделей складних систем при динамічних навантаженнях щодо планування раціональних конфігурацій підземного простору, що є одним з найважливіших етапів дослідження екологічних систем, що відносяться до класу складних. Вивчення структури важливо для виявлення закономірностей існування і розвитку систем, виявлення таких особливостей і недоліків досліджуваних структур, які вимагають підвищеної уваги не лише дослідника, а й особи, що приймає рішення в реальній складній системі. Розглядаються структурні властивості когнітивної карти складної системи на основі симпліціального аналізу, беручи до уваги факт, що структура складної системи, утворена її підсистемами, елементами і відносинами між ними, визначає її властивості, поведінку (розвиток, динаміку).

У розділі 3 розглядаються формалізовані концепти підземних об’єктів. Показано результати збору експертних даних для описаних вище задач, отримані оцінки були переведені в числову форму і завантажені в модель, отримані результати розрахунку для порівняння груп об’єктів (існуюча система труб і концепт підземного дюкера; мостові і тунельні переходи ріки Дніпро). На основі створеної і заповненої моделі порівняння вищезазначених об’єктів розглянуто у декількох сценаріях: як для випадку будь-якої з можливих небажаних подій, так і для конкретних конфігурацій небажаної події (умисна диверсія, технічна несправність, зсув ґрунту тощо). Для розглянутих сценаріїв на основі результатів моделювання сформульовано висновки щодо переваг підземного тунельного

дюкера під Дніпром одного із існуючою системою каналізаційних труб по дну Дніпра.

Використовуючи як вихідні результати, отримані на етапі морфологічного аналізу та збору даних, виконується імпульсне когнітивне моделювання з метою розробки сценаріїв використання підземного простору Києва при військових загрозах і природних надзвичайних ситуаціях. Безпосередньо створюються сценарії обґрунтування доцільності побудови запропонованого авторами тунельного дюкеру під Дніпром для перепуску стічних вод з правобережного Києва до Бортницької станції аерації з врахуванням впливу низки небажаних подій.

1 ФОРМАЛІЗАЦІЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ І СИСТЕМНИХ ЗВ'ЯЗКІВ РОЗВИТКУ УРБАНІСТИЧНОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ І ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ

1.1 Побудова концепції системного підходу до моделювання і сценарного аналізу планування розвитку інфраструктури мегаполісу в умовах екологічних, техногенних і терористичних загроз, що базується на спільному застосуванні методологій передбачення, когнітивного моделювання та фрактального аналізу

Однією з характерних рис сучасного світу є зростання мегаполісів, розширення інфраструктури та зростання їх населення, що призводить до різкого скорочення кількості неосвоєних міських територій. У свою чергу це веде до пошуку нових місць для розміщення виробничих, соціальних та інших об'єктів людської діяльності. «Рішення широкого кола соціально-економічних, архітектурно-планувальних та екологічних завдань мегаполісів невіддільне не тільки від раціонального використання наземних міських територій, а й від планомірного і комплексного освоєння підземного простору міст, де доцільно розміщувати споруди різного призначення». Створюваний людиною в процесі підземного будівництва простір мегаполісів стає новим, підземним середовищем проживання, яке повинно бути комфортним і безпечним для людини. Мільйони людей покладаються сьогодні на підземні комунікації, які надійно забезпечують зручність і комфорт. Експлуатація нової підземної інфраструктури стимулює і підтримує сталий розвиток міст, стає його невід'ємною складовою [12, 13].

Останнім часом в рамках гірничих наук розвивається нова наука – «Будівельна геотехнологія» [14], предметом дослідження якої є техногенно перетворені надра землі «... наукового напрямку – комплексного освоєння підземного простору надр, відмінною рисою якого є принцип пріоритетності рівня комфортності праці та відпочинку людини при будівництві підземного простору в

тому числі, при утилізації та повторному використанні підземних об'єктів». Вагомий внесок в цей напрямок внесли праці Б.А. Картозія [8, 15–17]. Розвиток науки «Будівельна геотехнологія» і її практичного застосування – освоєння підземного простору – вимагають розвитку методології дослідження проблем підземного будівництва. Існуюча методологія дослідження, проектування і будівництва підземних споруд як в частині архітектурно-планувальних рішень, так і в частині безпечного ведення гірничобудівельних робіт, потребує подальшого вдосконалення. У будь-якому випадку, ця методологія повинна інтегрувати різні наукові розділи і напрямки, повинна бути міждисциплінарною.

Підземне містобудування є складною системою в багатьох аспектах. По-перше, ця система складається з багатьох взаємопов'язаних підсистем і об'єктів. По-друге, процеси, що протікають в цій системі і при будівництві, і при функціонуванні, також складні і в деяких випадках погано передбачувані, бо у великій мірі пов'язані з різними геологічними процесами. Проблеми, які супроводжують підземне містобудування, можна віднести до слабкоструктурованих проблем.

Все вищесказане дозволяє запропонувати методологію передбачення і когнітивного моделювання складних систем [18–20] для моделювання і сценарного аналізу планування розвитку інфраструктури мегаполісу в умовах екологічних, техногенних і терористичних загроз.

Такі задачі відрізняються багатьма протиріччями і невизначеностями. Найважливішими серед них є:

- неоднозначність і суперечливість вимог до виробу;
- суперечливість цілей і неоднозначність умов застосування виробу;
- невизначеність і непередбачуваність можливих дій конкурентів;
- нескінченність і непрогнозованість ситуацій ризику на різних стадіях життєвого циклу виробу.

За цих умов, користуючись різнорідною, зазвичай неповною, емпіричною, експериментальною, казуальною та іншою вихідною інформацією, розробник повинен формалізувати і розв'язати задачу проектування виробу, зокрема сформулювати й обґрунтувати цілі його створення. Результати розв'язання цієї задачі повинні довести практичну необхідність, технологічну можливість та економічну доцільність виробництва виробу, що проектується [21]. За умов ринкової економіки слід також оцінювати ступені та рівні ризику на кожній стадії життєвого циклу виробу і з урахуванням усіх факторів приймати такі рішення, щоб ризик був прийнятним. Зрозуміло, що за умов невизначеності доводиться виконувати процедури формалізації й розв'язання багатьох інших практично важливих системних задач.

Моделі і методи процесу передбачення і когнітивного моделювання складних систем дозволяють розробити когнітивну модель системи, з її допомогою провести аналіз структурних властивостей системи, її стійкості і, головне, провести аналіз можливих шляхів розвитку системи при змінах параметрів її внутрішнього і зовнішнього середовища і при різних керуючих впливах. Розглянемо, в якому напрямку дослідження проблем будівельної геотехнології може бути використано методологію передбачення і когнітивне моделювання складних систем.

В даний час структура науки будівельної геотехнології представлена чотирма основними розділами: підземна урбаністика, механіка підземних споруд, геоніка і управління станом гірських порід при будівництві. Для проведення досліджень за допомогою розроблюваної методології представляють інтерес зміст всіх розділів. Так, змістом одного з напрямків першого розділу є обґрунтування стратегії і методів освоєння підземного простору, що є також і одним із завдань процесу передбачення і когнітивного моделювання складних систем. На етапі проектування підземних споруд необхідно розглянути і обґрунтувати соціально-економічну доцільність і технічну можливість будівництва підземних споруд в гірничо-геологічних умовах і в умовах впливу технології будівельних робіт,

функціонального призначення будівельних об'єктів; завдання обґрунтування доцільності, можливості, ефективності дій в складних системах також входять в область завдань передбачення і когнітивного моделювання. Знання і дані з інших наукових розділів будівельної геотехнології також можуть бути корисні при когнітивному моделюванні структури і поведінки системи, що імітують реальну систему з позицій поставленої мети дослідження і функціонування. Так, «оцінка стійкості гірничих виробок; дослідження процесів взаємодії інженерних конструкцій з породними масивами і встановлення якісних і кількісних характеристик їх напружено-деформованого стану» та ін. (другий розділ) може представити дані і отримати нові знання про них після процесу передбачення та когнітивного моделювання при аналізі властивостей когнітивної моделі; третій розділ, Геоніка, що включає дослідження «взаємозв'язків елементів технології гірничо-будівельних робіт, встановлення якісних і кількісних параметрів, що визначають вибір способів, техніки і технології будівництва; ефективних методів організації праці та управління роботами з будівництва ...» виявляються необхідними при розробці процесу передбачення і когнітивної моделі, встановлення відносин між її об'єктами (або «концептами», «чинниками», «сутностями»), які є також концептами (поняттями), пов'язаними з підземним містобудуванням. Істотною перевагою когнітивних моделей є те, що в їх склад на різних стадіях і рівнях вивчення і опису можна включати як кількісні (наприклад, «гідростатичний тиск»), так і якісні (наприклад, «соціально-економічна доцільність») характеристики.

На нашу думку проведення імітаційного когнітивного моделювання, особливо на стадії проектних робіт з освоєння підземного простору, вкрай необхідно. Серйозною причиною для цього може послужити те, що необхідно передбачити і заздалегідь виключати або знижувати ризики (управляти ризиками), які неминуче притаманні підземному містобудування. Як сказано в [14, с.17]: «Міське підземне будівництво характеризується динамізмом і високим ступенем

невизначеності, тому фактор ризику – невід'ємний атрибут освоєння підземного простору»; ризики при певних умовах виявляються і можуть мати негативні наслідки для всієї підземної інфраструктури в системі «людина – підземна споруда – навколишнє середовище». Знання про ризики необхідні всім – і проектувальникам, і будівельникам, і експлуатаційникам. В роботі [22] була запропонована класифікація ризиків, що складається з 8 груп: будівельні, екологічні, управлінські та виконавські, комерційні, економічні, контрактні, соціальні та експлуатаційні. Класифікація дає основу для подальшої розробки екологічно безпечних технологій і способів будівництва. Будівельний ризик є домінуючим за впливом на весь життєвий цикл підземної споруди і він тим вище, ніж «нижче вимоги до кваліфікації персоналу, якості і термінів будівництва, надійності гірничопрохідницького устаткування і ін. Неправильні будівельні рішення є базою для виникнення екологічних, економічних, експлуатаційних і ін. ризиків». Тому основним принципом, закладеним в дослідження щодо вдосконалення методів проектування і будівництва підземних об'єктів, є принцип мінімізації збитку від наслідків негативних проявів ризиків з урахуванням взаємодії і взаємовпливу всіх природних, технічних, технологічних та інших факторів. Можливість катастроф, викликаних не тільки непередбачуваними природними ситуаціями, але і помилками проектування, недосконалістю існуючих технологій, вимагають постановки і вирішення проблеми життєстійкості об'єкта в екстремальних і надзвичайних ситуаціях.

Тому метою процесу передбачення і когнітивного моделювання було дослідження деяких проблем життєстійкості об'єкта в екстремальних і надзвичайних ситуаціях. Когнітивний підхід до вирішення цієї проблеми зажадав визначення і опису основних елементів (параметрів, факторів, концептів), причин і наслідків, які характеризують природно-технічну геосистему («підземна конструкція – навколишнє середовище»). В результаті когнітивного моделювання повинні бути отримані сценарії можливого розвитку складної системи, які можуть

виникнути під впливом змін внутрішнього і зовнішнього середовища підземної споруди. Це особливо важливо для знання і запобігання негативним наслідкам, зведення до мінімуму шкоди в умовах впливів самого несприятливого поєднання негативних факторів: зовнішніх і внутрішніх статичних і динамічних навантажень, всіляких техногенних впливів всередині підземної споруди, шкідливих природних проявів з боку масиву гірських порід тощо. В кінцевому підсумку завдання зводиться до задачі управління ризиками як до задачі вибору варіантів стратегії і тактики дій (стосовно до підземного будівництва – це конструктивні рішення, технологія і організація робіт), що дозволяють частково або повністю уникати ризиків, обмежувати їх чисельність і, в кінцевому підсумку, зводити до мінімуму шкоду від їх негативних проявів.

Розробка стратегії інноваційного планування розвитку підземного будівництва відноситься до класу слабкоструктурованих завдань, в яких цілі, структура та умови відомі лише частково і характеризуються великим обсягом НЕ-факторів: неточністю, неповнотою, невизначеністю, нечіткістю даних, що описують об'єкт. На відміну від задач прийняття рішень з кількісними значеннями змінних і відношень між ними, які вирішуються методами і засобами теорії дослідження операцій, економетрики та іншими подібними методами, для вирішення слабкоструктурованих завдань необхідні специфічні методи підтримки прийняття рішень. Опис слабкоструктурованих завдань здійснюється, як правило, експертами-фахівцями в даній області. Оцінки, отримані від них, є суб'єктивними і, як правило, носять вербальний характер.

Багатофакторна, багатопараметрична, різнорідна і слабкоструктурована інформація предметної області об'єкта дослідження, використовувана на різних етапах процесу передбачення, призводить до складнощів, пов'язаних з форматом подання знань, побудовою опитувальних форм, обробкою результатів і узгодженим управлінням процесом передбачення в цілому. Неформалізовані, неоднорідні і слабо структуровані дані з предметної області потребують єдину

структурну мову опису і єдиний формат подання. Запропоновано проводити розв'язання задач передбачення на основі поглибленої аналітики слабкоструктурованих даних щодо техногенних, екологічних та економічних процесів [23]. Поєднання методик та прийомів обробки великих об'ємів неструктурованої інформації з методологіями системного і сценарного аналізу забезпечить можливість довгострокового передбачення поведінки складних систем різної природи на основі використання фактів, відношень, показників, отриманих як традиційним для передбачення експертним оцінюванням, так і шляхом поглибленого аналізу великого корпусу текстових документів. Це дає змогу адекватно і своєчасно розробляти і адаптувати стратегії в умовах постійного зростання об'ємів актуальної інформації і змін у навколишньому світі, при цьому враховуючи існування суттєвих невизначеностей та багатофакторних ступенів і рівнів ризику, що гарантує сталий розвиток досліджуваної системи відповідно до умов розвитку, обраних у сценаріях ключових технологій та галузей.

Розв'язуючи наближені до реальності задачі передбачення, на різних його етапах використовують різні методи якісного аналізу в єдиній людино-машинній процедурі. Це потрібно робити з урахуванням: недоліків і переваг кожного методу; особливостей досліджуваної системи щодо топології взаємозв'язків між її внутрішніми елементами; характеру інформації, що циркулює в системі (кількісного чи якісного); суперечливості критеріїв, на множині яких розв'язують задачу; ступеня невизначеності інформації та інших аспектів. Вирішення таких проблем можливе лише із застосуванням системного підходу, коли враховують всю сукупність властивостей і характеристик досліджуваних систем, як і особливостей методів та процедур, використаних для їхнього створення. На підставі порівняння характеристик методів якісного аналізу, вимог до їхнього застосування, недоліків і переваг кожного з них дослідники проблем передбачення повинні вибрати оптимальну комбінацію методів, встановити правильну послідовність їхнього викори-

стання з урахуванням усієї сукупності вимог до досліджуваних систем та особливостей розв'язуваних задач.

В даний час при залученні методології передбачення в Інституті прикладного системного аналізу КПІ ім. Ігоря Сікорського (ІПСА) виконана формалізація ряду методів якісного аналізу (методу аналізу ієрархій (МАІ) і його модифікації, морфологічного аналізу, методу Делфі [9, 24, 25], та ін.), які стали основою інструментарію побудови альтернатив сценаріїв. Зближення об'єктивних знань і творчих припущень в інтерактивній людино-машинній процедурі дає змогу підвищити достовірність альтернатив сценаріїв досліджуваних процесів, явищ і подій. Такий процес забезпечують із використанням свідомості та універсальної сукупності засобів і підходів, яку називають інформаційною платформою сценарного аналізу (ІПЛСА). Ця платформа є комплексом математичних, програмних, логічних та організаційно-технічних засобів та інструментів для здійснення цілісного процесу передбачення на основі інтерактивної взаємодії людини і спеціально створеного для цього програмно-технічного середовища. Слід зазначити, що під час розв'язання практичних задач передбачення на основі ІПЛСА експертні оцінки зазвичай одержують через Інтернет у режимі онлайн.

Розроблено системний підхід до моделювання і сценарного аналізу планування розвитку інфраструктури мегаполісу в умовах екологічних, техногенних і терористичних загроз, що базується на спільному застосуванні методологій передбачення, когнітивного моделювання та фрактального аналізу. Вперше пропонується використовувати зазначені методології спільно: на першому етапі застосовувати методологію передбачення і фрактального аналізу, отримані результати використовувати в якості вихідних даних на другому етапі – для когнітивного моделювання, що дозволяє запропонувати науково обґрунтовану стратегію реалізації пріоритетної альтернативи сценарію планування розвитку інфраструктури мегаполісу.

Програмний продукт, покладений в основу платформи ІПЛСА, є розподіленою інформаційною системою прийняття рішень під час побудови сценаріїв майбутнього і поєднує в собі потужний математичний апарат і створений на основі сучасних технологій програмування зручний та гнучкий веб-інтерфейс користувача. Структурна схема системного підходу до розв'язання проблем планування розвитку підземної інфраструктури у вигляді двоетапної моделі наведена на рис. 1.1. Залучення на першому рівні етапу передбачення методів сканування, STEEP аналізу, мозкового штурму, SWOT аналізу дозволяє за допомогою експертного оцінювання виявити критичні технології в економічних, соціальних, екологічних, технічних, технологічних, інформаційних та інших напрямках. За допомогою методу SWOT-аналізу виявляються істотні внутрішні (Strength, Weaknesses) і зовнішні (Opportunities, Threats) чинники системи, які впливають на організаційні і технологічні стратегії.

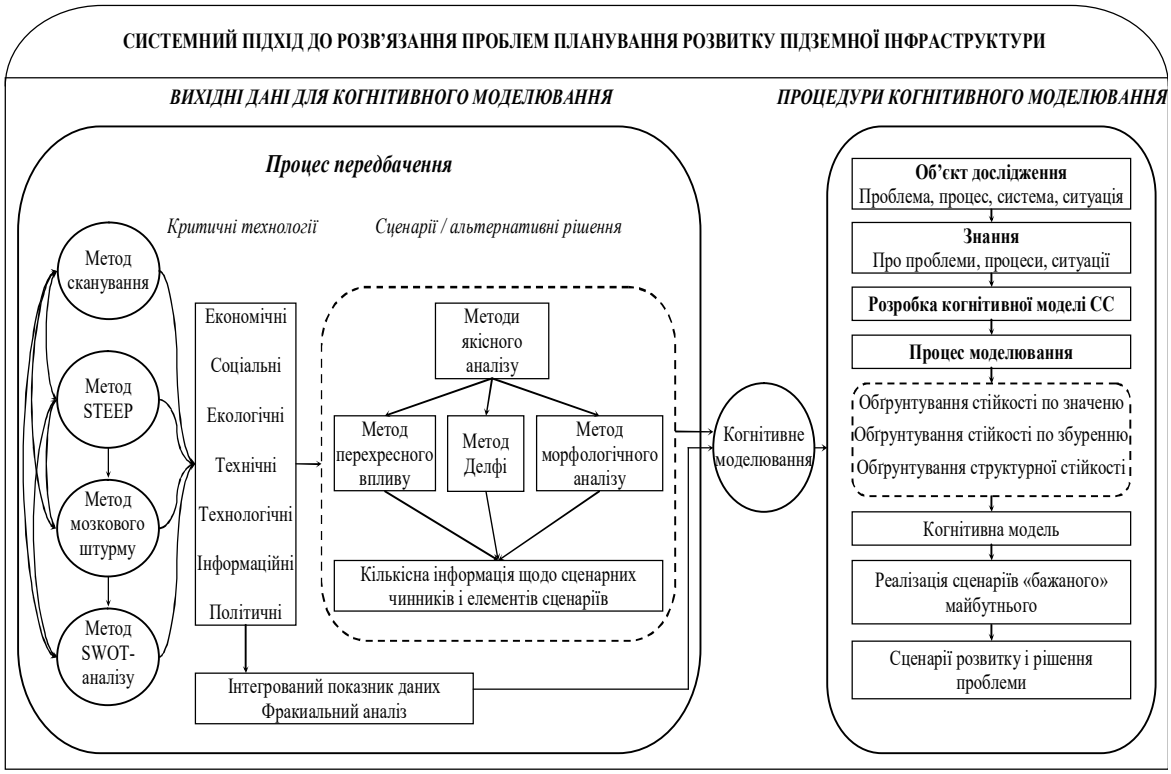


Рисунок 1.1 – Структурна схема системного підходу до розв'язання проблем планування розвитку підземної інфраструктури

Із залученням методу мозкового штурму глибоко і інтенсивно вивчаються проблеми у вузьких напрямках, діапазонах або фокусах ідей і підходів, що надає можливість відібрати і задокументувати ті ідеї та підходи до вирішення проблеми, які будуть використовуватися на наступних етапах передбачення. Основу даного рівня складають підсистеми якісного аналізу, які прямими і зворотними зв'язками пов'язані з системою моніторингу і натурних випробувань. Отримані після аналізу і обробки кількісні дані є початковими для вирішення комплексу завдань передбачення. На другому рівні із застосуванням методів якісного (морфологічного аналізу, Делфі, аналізу ієрархій (МАІ) і їх модифікацій, та ін.) і кількісного (прогнозу, статистичного аналізу, багатофакторних ризиків та ін.) аналізів вирішуються завдання оцінювання поведінки підземних об’єктів і підготовки до ухвалення рішень у вигляді альтернатив сценаріїв. Остаточні рішення приймаються ОПР, якому пропонуються варіанти (альтернативи) для вибору серед різних альтернатив на основі оцінювання множини цілей, що є найчастіше непорівнянними й суперечливими. Практичні рішення приймаються з урахуванням досвіду, знань і думки людей, які будуть реалізовувати ці рішення. Результати, що отримані на етапі передбачення, використовуються як вихідна інформація для знаходження шляхів побудови альтернативи того чи іншого сценарію у вигляді когнітивної карти.

У ряді випадків, коли вихідна інформація для когнітивного моделювання задається у статистичній формі у вигляді окремих логічних груп, пропонується підхід до побудови інтегрованого показника даних, що полягає в розбитті підмножини вихідних факторів на уточнюючі фактори, обґрунтованої декомпозиції вершин когнітивної карти на логічні групи та їх підгрупи, а також, їх агрегування [26].

Для обґрунтованої реалізації тої чи іншої альтернативи сценарію залучається методологія когнітивного моделювання, що дозволяє на підставі знання і досвіду побудувати причинно-наслідкові зв'язки, зрозуміти і

проаналізувати поведінку складної системи (СС) на стратегічну перспективу при великій кількості взаємозв'язків і взаємозалежностей і запропонувати науково обґрунтовану стратегію реалізації пріоритетного сценарію [27–29].

1.2 Актуальність і постановка задачі розвитку урбаністичного простору

Відповідно до проєкту Генерального плану розвитку Києва до 2025 р. новим і вкрай важливим напрямком розвитку транспортної інфраструктури столиці України стануть протяжні автомобільні тунелі, які повинні суттєво збільшити пропускну спроможність транспортних шляхів, сприяти збереженню історичної забудови в центральній частині міста, розвантажити її від транзитних транспортних потоків і суттєво покращити екологічні показники середмістя [30]. Кількість автомобільних тунелів відповідно до Генерального плану складає 8, причому три з них пройдуть під Дніпром, а п’ять будуть з’єднувати транспортні артерії міста в межах правого берега (рис. 1.2). За «оптимістичним сценарієм» в найближчі десять років в Києві може бути споруджено понад 20 км транспортних тунелів.

Слід зауважити, що історія планування міст ніколи не передбачала сучасної кількості автомобілів, тому стан і розвиток міського автомобільного транспорту свідчить про гострі проблеми невідповідності організації міського простору сучасним транспортним потокам. Численні затори й «корки» в середмісті (особливо в «часи пік») призвели до середньої швидкості автомобільного руху в мегаполісах близько 15 км на годину з постійним зростанням аварійності руху. Ще більшою проблемою є забруднення повітряного простору міст шкідливими вихлопними газами, зокрема продуктами окиснення й неповного згоряння вуглеводневого палива: монооксиду вуглецю, оксиду азоту, канцерогенних вуглеводнів та ін., причому найбільші викиди припадають на СО. Концентрація шкідливих речовин у повітрі магістральних транспортних артерій міста є не менш загрозливою, ніж концентрація шкідливих речовин в осередках потужних

хімічних та гірничо-металургійних виробництв. За даними екологічних організацій у загальній кількості забруднюючих речовин у повітрі мегаполісів вихлопи автомобілів сягають в середньому близько 70%, внесок об’єктів теплоенергетики – 24%, викиди промислових підприємств – 6% [3, 31].

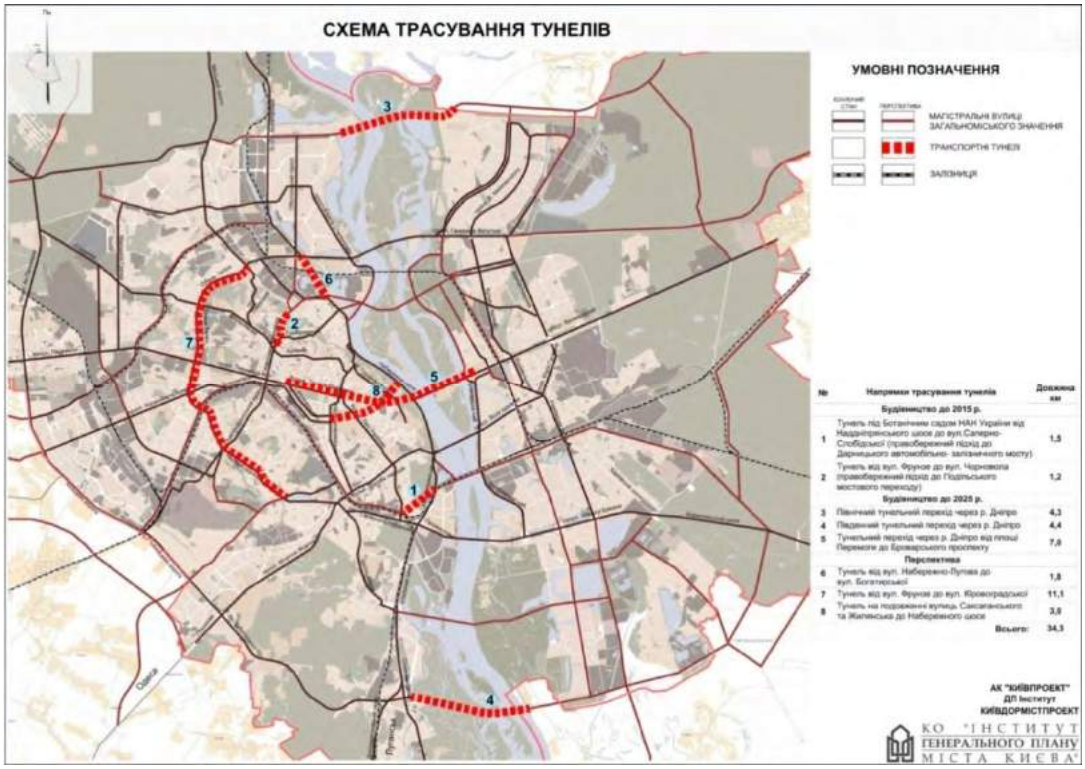


Рисунок 1.2 – Схема трасування тунелів м. Києва

(Генеральний план Києва до 2025 р.)

Така ситуація є неприйнятною і вимагає різкого зниження викидів і токсичності вихлопних газів. Для цього стимулюється й регламентується низка заходів [32–37]. Перша група заходів – удосконалення автомобільного транспорту: економічність автомобільних двигунів, більш повне спалення в них пального, підвищення його якості, особливі фільтри вихлопних газів тощо. Проте перехід на екологічно прийнятні моделі двигунів (стандарт Євро-5 і вище), вдосконалене вуглеводневе чи водневе паливо, або перехід на електромобілі потребує тривалого часу, хоча економічне стимулювання цього процесу в країнах ЄС і США сприяє поступовим змінам. В Україні темпи оновлення автомобільного парку

екологізованими моделями відносно низькі, рівень доходів населення не дає змоги у близькій перспективі відмовитися від старих автомобілів, що зберігає значні екологічні ризики для великих міст.

Інший шлях передбачає організаційні заходи регулювання руху автомобілів, що обмежують транспортні потоки у мегаполісах. У більшості європейських столиць мінімізований в'їзд вантажних автомобілів на територію міста, кільцеві дороги зменшують транзитні потоки, платний в'їзд у середмістя також здатен суттєво обмежити кількість автомобілів в історичних частинах міст, проте усі ці заходи здебільшого вичерпали свій потенціал, як і спроби розширення проїзної частини міських вулиць, при цьому транспортна проблема мегаполісів залишається невирішеною. Зміна ситуації пов'язана з розвитком міського тунельного будівництва.

Крім очевидних переваг, пов'язаних з великою швидкістю пересування автомобільними тунелями (однобічний рух, відсутність світлофорів, пішохідних переходів, перетинання ліній руху та ін.) вперше відкривається можливість вирішити проблему екологічного забруднення великих міст. Якщо припустити, що в підземному просторі автомобіль буде проходити 60-70% транспортного шляху, а вихлопні гази, які потрапили в тунель, вдасться відвести на безпечні відстані, утилізувати або очистити, то сумарні шкідливі викиди в атмосферу міста можна зменшити в 2,5–3 рази, що якісно змінить екологію довкілля.

Економічні витрати на будівництво й експлуатацію системи автомобільних тунелів є зіставними з витратами на інші способи вирішення екологічної проблеми міського автомобільного транспорту. Приміром, діюча з 2008 р. у Лондоні програма оснащення автомобілів спеціальними екологічними фільтрами, передбачає витрати від 1,6 до 5 тис. фунтів стерлінгів на один автомобіль (в залежності від марки й моделі транспортного засобу). Враховуючи багатомільйонний парк приватних автомобілів Лондона, загальна вартість програми перебільшує 12 млрд. фунтів, що достатньо для переведення основних

транспортних потоків на підземний рівень. При цьому крім вирішення екологічних проблем мегаполіса, швидкість пересування тунелями збільшиться в декілька разів.

Вже перші тунелі дозволили звернути увагу на можливість відсмоктувальної вентиляції управляти потоком повітря тунелів і викидати його на поверхню в зручному й безпечному місці, подалі від залюднених вулиць. Вентиляція сучасного автомобільного тунелю достатньо ефективно дозволяє відсмоктувати весь обсяг відпрацьованого повітря разом з вихлопними газами транспортного потоку, а його переробка та очищення відкривають нові можливості в управлінні екологічною ситуацією в великому місті.

Для знешкодження найбільш проблемної складової вихлопних газів автомобільних тунелів – монооксиду вуглецю, передбачається накопичення газу в особливих камерах і спалення його для отримання теплової енергії, або переведення CO в CO_2 шляхом електророзрядів великої потужності [38]. Авторами розроблений спосіб вентиляції автомобільного тунелю [35], що включає подачу свіжого повітря через портали тунелю і відведення відпрацьовано повітря всмоктуючим вентилятором через вентиляційний стовбур, що оснащується системою касетного очищення повітря шляхом облаштування устя стовбуру каталітичною камерою, заповненою перекриваючими стовбур перфорованими касетами, у яких шари вологопоглинувача чергуються із шарами каталізатора окиснення монооксиду вуглецю (CO) у діоксид вуглецю (CO_2), а під каталітичною камерою у стовбурі розміщують конденсаційний осушувач повітря.

Таким чином, технічна проблема відведення або очищення загазованого повітря автомобільних тунелів може бути вирішена кількома способами і здатна вирішити завдання екологічної безпеки середмістя мегаполісів.

1.3 Побудова морфологічної моделі розвитку підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору

В даній роботі одним із методів, які застосовувались для дослідження розвитку підземної інфраструктури великих міст, був метод морфологічного аналізу [9, 19, 20, 39], що є потужним інструментом оцінювання складних об'єктів і систем з великим набором взаємопов'язаних характеристик, в тому числі якісних. В основі методу лежить експертне оцінювання, яке на етапі прийняття рішення часто є головним джерелом інформації щодо об'єкта.

Метод морфологічного аналізу доцільно застосовувати для об'єктів, яким притаманна суттєва невизначеність, що в повній мірі є актуальним для задачі оцінювання потенційної ділянки будівництва автомобільного тунелю.

З інженерно-геологічної точки зору тунель є протяжним об'єктом, що може проходити через суттєво різні ділянки геологічного середовища. Крім того, точна оцінка всіх факторів впливу потребує суттєвих затрат часу і ресурсів, пов'язаних з проведенням інженерних і геологічних робіт і вимірювань, що не завжди є економічно доцільним на стадії прийняття рішення.

Зі структурно-функціональної точки зору потенційне будівництво тунелю впливає на досить велику частину міського простору, яка суттєво виходить за межі власне ділянки над трасою тунелю. У межах цього простору структурно-функціональні характеристики можуть значно відрізнятися, причому в їх оцінюванні присутній суб'єктивізм, пов'язаний як з якісною природою більшості з цих характеристик, так і з визначенням меж території, на яку вплине потенційне будівництво тунелю.

Метод морфологічного аналізу дозволяє певною мірою подолати різнорідність і суб'єктивізм за рахунок використання незалежних оцінок окремих альтернатив кожного з параметрів, і проведення перерахунку оцінок альтернатив з

використанням матриці взаємозв'язків, що коригує початкові грубі оцінки шляхом урахування впливу інших характеристик об'єкта.

Задачу побудови морфологічних таблиць (МТ) для проведення модифікованого методу морфологічного аналізу (ММА) з метою прийняття рішення щодо потенційної ділянки (траси) будівництва автомобільного тунелю було вирішено розбити на два завдання, які б враховували впливи факторів геологічного середовища та структурно-функціональних характеристик території з ризиками екологічних та техногенних загроз. Для кожної з них застосовувався двоетапний модифікований морфологічний аналіз [40].

Перше завдання стосувалось врахування геологічного середовища по трасі тунелю. За основу були взяті попередні дослідження [41, 42], де була побудована модель оцінювання ділянок для підземного будівництва паркінгів. На відміну від відносно невеликих ділянок будівництва паркінгів, що локалізуються переважно в умовах однотипного геологічного середовища, тунелі мають значну протяжність (тисячі метрів) і можуть знаходитись у різних інженерно-геологічних та морфологічних умовах (мати змінні альтернативи параметрів впливу). Для коректного відображення цієї ситуації була запропонована методика врахування змінності альтернатив параметрів вздовж траси тунелю шляхом внесення експертом в опитувальні форми для кожної альтернативи такої оцінки, що відповідає протяжності ділянки з альтернативним параметром, віднесеній до всієї довжини тунелю: однозначно ні – 0; переважно ні – від 0 до 0,25; скоріш ні, ніж так від 0,25 до 0,5; і так і ні в рівній мірі – 0,5; скоріше так ніж ні – від 0,5 до 0,75; переважно так – від 0,75 до 1; однозначно так – 1. Таким чином, кожна альтернатива параметру отримує свою оцінку у відповідності до імовірності реалізації по довжині тунелю. У випадку коли загрозливі альтернативи факторів зосереджуються на відносно невеликій ділянці тунелю, а ситуація на інших його ділянках значно відрізняється від найбільш несприятливої частини, треба окремо оцінювати весь тунель і найбільш ризиковану ділянку. Крім того, оскільки

протяжна траса тунелю може потрапити в зону пливуна, який різко погіршує сприятливість ділянки підземному будівництву, ця важлива альтернатива була особливим чином врахована в МТ параметрів і досліджена в роботі.

На першому етапі для опису геологічного середовища використовувалася МТ з 10 параметрами, представлена в табл. 1.1.

На основі оцінювання цієї таблиці розраховувались ваги елементів рішення. МТ для елементів рішення (табл. 1.2) була дещо адаптована порівняно із попереднім дослідженням: залишені тільки ті фактори ризику (параметр D), які пов'язані з інженерно-геологічними процесами, решта факторів ризику перейшли до другого завдання; крім того, модифіковані альтернативи рекомендованих масштабів і глибини підземного будівництва (параметри B, C) наведені з урахуванням того, що підземне будівництво стосується конкретного класу об'єктів (тунелі). Для параметра F (рівень ризику) розмір збитку враховується, як вартість будівництва тунелю Q, помножена на співвідношення довжини найбільш несприятливої ділянки W. Остаточний вигляд адаптованої МТ наведено в табл. 1.2.

Друге завдання стосувалось врахування структурно-функціональних характеристик 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.

Таблиця 1.1 – Морфологічна таблиця інженерно-геологічних факторів ділянки будівництва тунелю

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 ($К_{сн}$<1)
	2.2. Помірний (1<$К_{сн}$<2)
	2.3. Відносно високий (2<$К_{сн}$<3,5)
	2.4. Високий ($К_{сн}$>3,5)
3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву	3.1. Незначний ($К_{мас}$<0,05, МПа)
	3.2. Помірний (0,05<$К_{мас}$<0,3, МПа)
	3.3. Високий (0,3<$К_{мас}$<0,5, МПа)
	3.4. Вельми високий ($К_{мас}$>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. Невивітрилі глини та піски середньої щільності
	5.2. Техногенні відклади (намивні 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 $P\text{-}N_{1пр}$
	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 підтоплення та/або пливуни
8. Тип рельєфу і морфометрія	8.1. Пласкі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини (нахил поверхні до 1 °)
	8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів (нахил поверхні 1-4 °, щільність розчленованості рельєфу 0-2 *км/км*^{2})
	8.3. Долини малих річок, слабко розчленовані схили, висока заплава (нахил поверхні 4-8 °, щільність розчленованості рельєфу 2-3 *км/км*^{2})
	8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава (нахил поверхні >8 °, 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

Таблиця 1.2 – Морфологічна таблиця елементів рішення щодо ділянки будівництва тунелю

Параметр	Альтернатива
A. Придатність ділянки	A.1. Придатна
	A.2. Непридатна
B. Масштаб об’єкта	B.1. Площа перерізу до 10 м^2
	B.2. Площа перерізу до 25 м^2
	B.3. Площа перерізу до 40 м^2
	B.4. Площа перерізу понад 40 м^2
C. Рівень забудови	C.1. 0–10 м
	C.2. 10–20 м
	C.3. 20–60 м
	C.4. глибше 60 м
D. Фактор ризику	D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності
	D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд
	D.3. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об’єкти
	D.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів
E. Ступінь ризику	E.1. <3%
	E.2. 3–10%
	E.3. 10–20%
	E.4. 20–50%
	E.5. >50%
F. Рівень ризику	F.1. 0,1–5% QW
	F.2. 5–20% QW
	F.3. 20–50% QW
	F.4. >50% QW

Серед ризиків, які найбільш доцільно розглядати, можна сформувати чітку групу техногенних і екологічних ризиків, які можна мінімізувати шляхом будівництва тунелів:

P1. Забруднення повітря (викиди шкідливих вихлопних газів);

P2. Шум і динамічні впливи (гул двигунів, 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).

Обрана група ризиків певною мірою визначила побудову МТ для завдання аналізу структурно-функціональних характеристик території за допомогою ММММА.

Побудована МТ першого етапу містить 8 параметрів, які є найбільш важливими для визначення доцільності тунелю і його впливу на мінімізацію різного роду ризиків:

1) тип забудови в районі потенційного тунелю – цей параметр впливає в першу чергу на вагомість різних факторів ризику. Для житлової забудови, туристичних об’єктів, парків більшу вагу мають фактори забруднення повітря і шуму; для промислової забудови і незабудованих територій ця вага значно менша;

2) щільність житлової забудови – параметр доповнює попередній, тісно пов’язаний з рядом інших параметрів і теж визначає вагомість факторів ризику;

3) фактор середмістя – визначає, наскільки територію можна віднести до такої, що входить до середмістя або впливає на автомобільний рух у середмісті;

4) залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю – параметр впливає на вагомість факторів ризику – в першу чергу, аварій (більший ризик для пішоходів), також факторів шуму і забруднення. Також параметр впливає на здатність тунелю зменшити вплив факторів ризику, оскільки тунель створює менше можливостей для аварій і заторів, викликаних пішохідними переходами;

5) інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю – параметр першочергово впливає на доцільність побудови тунелю. Також є помітний вплив цього параметра на вагомість факторів ризику – чим інтенсивніший рух, тим більш важливим стає фактор заторів. При великій інтенсивності руху тунель значно вплине на всі фактори ризику – чим інтенсивніший рух буде переведено в тунель, тим менше буде вплив всіх розглядуваних факторів ризику;

6) середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю – параметр змінює вплив тунелю на фактори ризику: якщо швидкість була низька – тунель зменшує фактор забруднення і заторів, якщо швидкість була висока – тунель зменшує фактор шуму

і аварій. Також висока швидкість свідчить про вагомість фактору аварій – на високій швидкості аварії є більш небезпечними;

7) наземна зв’язаність кінців тунелю автошляхами – параметр впливає на доцільність побудови тунелю, вагомість фактору заторів – при поганій зв’язаності наявність або відсутність заторів є дуже критичною. Відповідно, є зв’язок і в протилежний бік – якщо зв’язаність була погана, то побудова тунелю здійснює позитивний вплив на фактор заторів за рахунок розвантаження шляхів;

8) пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю (ширина доріг, наявність перехресть, в тому числі нерегульованих) – параметр впливає на доцільність побудови тунелю, вагомість фактору заторів – при поганій пропускній здатності наявність або відсутність заторів є дуже критичною, потенційний тунель здійснює позитивний вплив на фактор заторів і аварій.

МТ з вищезазначеними параметрами і їх альтернативами наведена в табл. 1.3.

Очевидно, ці параметри є взаємопов’язаними, тому в дослідженні пропонується використати повноцінну двоетапну процедуру МММА, з перерахунком оцінок також і на першому етапі дослідження для урахування взаємозв’язків між параметрами.

Наявність або відсутність взаємозв’язків для параметрів таблиці 4 оцінена матрицею, наведеною в табл. 1.4, де позначка «+» означає наявність взаємозв’язків між хоча б однією парою відповідних параметрів, «–» означає відсутність таких зв’язків.

Таблиця 1.3 – Морфологічна таблиця параметрів впливу на структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори

Параметр	Альтернативи параметра
1. Тип забудови в районі потенційного тунелю	1.1. Житлова забудова
	1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова
	1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти
	1.4. Парки, зони відпочинку
	1.5. Промислова забудова
	1.6. Незабудовані території
2. Щільність житлової забудови	2.1. Дуже низька
	2.2. Низька
	2.3. Середня
	2.4. Висока
3. Фактор середмістя	3.1. Ділянка розташована в зоні середмістя
	3.2. Ділянка поза середмістям, але суттєво впливає на автомобільний рух у середмісті
	3.3. Ділянка поза середмістям (без впливу на нього)
4. Залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю	4.1. Дуже низька
	4.2. Низька
	4.3. Середня
	4.4. Висока
5. Інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю	5.1. Низька
	5.2. Середня
	5.3. Висока
	5.4. Дуже висока
6. Середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю	6.1. до 15 км/год
	6.2. 15-30 км/год
	6.3. 30-60 км/год
7. Наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами	7.1. Дуже погана (немає відносно прямих шляхів, значний об'їзний рух з певними недоліками,)
	7.2. Погана (між кінцями тунелю є лише один шлях, який має певні недоліки)
	7.3. Середня (між кінцями тунелю є один магістральний шлях або декілька альтернативних шляхів з недоліками)
	7.4. Добра (між кінцями тунелю є більше одного магістрального шляху)
8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю	8.1. Погана (вузькі дороги, багато перехресть, особливо нерегульованих, захаращеність шляхів)
	8.2. Середня (є перехрестя, але в основному регульовані)
	8.3. Висока (магістралі, мало перехресть, вони регульовані)

Таблиця 1.4 – Матриця наявності або відсутності взаємозв'язків між параметрами табл. 1.3

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		+	+	+	+	–	–	–
2	+		+	+	+	–	–	–
3	+	+		–	+	+	+	+
4	+	+	–		–	–	–	–
5	+	+	+	–		+	+	–
6	–	–	+	–	+		+	+
7	–	–	+	–	+	+		–
8	–	–	+	–	–	+	–	

Для другого етапу МММА побудована МТ, яка показує доцільність побудови тунелю зі структурно-функціональної точки зору, а також профіль території потенційного будівництва тунелю з точки зору екологічно-безпекових факторів, пов'язаних зі зменшенням ризиків.

Ризики розглядались у двох аспектах:

1) Вагомість кожної із зазначених вище груп факторів ризику Р1–Р4. В даному випадку аналізується, наскільки той чи інший фактор ризику є важливим для конкретної території – наприклад, чим більше щільність населення, тим вагомішим є фактор забруднення повітря; чим більше інтенсивність руху, тим важливішим є фактор наявності чи відсутності заторів і т. д.

2) Здатність побудованого тунелю вплинути на мінімізацію відповідних факторів ризику. Аналізується, наскільки для даної території тунель зможе посприяти запобіганню або зменшенню відповідного фактору ризику. Значною мірою, це залежить від інтенсивності руху, однак для деяких факторів ризику можна встановити залежності і з іншими параметрами з табл. 1.4.

Два цих аспекти певною мірою корелюють, однак іноді є суттєві відмінності, які вимагають їх розгляду за допомогою різних параметрів. Наприклад, для великої щільності населення (залюдненості району) фактор забруднення повітря має суттєву вагу, однак здатність тунелю вплинути на цей фактор залежить не від щільності населення, а від зміни інтенсивності автомобільного руху (переведення

його значною мірою на підземний рівень). Тому для аналізу ризиків було виділено 5 параметрів: один з них порівнює між собою вагомість різних факторів ризику, його альтернативи формують «профіль» території з точки зору важливості різних факторів ризику, а інші чотири параметри описують здатність тунелю позитивно вплинути на зменшення кожної окремої з чотирьох розглядуваних груп ризику. Параметри для МТ другого етапу МММА зведені в табл. 1.5:

Таблиця 1.5 – Морфологічна таблиця структурно-функціональних і екологічно-безпекових факторів будівництва тунелю

Параметр	**Альтернатива**
A. Доцільність тунелю	A.1. Доцільний
	A.2. Недоцільний
B. Вагомість факторів ризику на ділянці	B.1. Забруднення повітря
	B.2. Шум і динамічні впливи
	B.3. Дорожні затори
	B.4. Дорожні аварії
C. Вплив побудови тунелю на фактор «Забруднення повітря»	C.1. Не впливає
	C.2. Частково мінімізує
	C.3. Помірно мінімізує
	C.4. Суттєво мінімізує
D. Вплив побудови тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»	D.1. Не впливає
	D.2. Частково мінімізує
	D.3. Помірно мінімізує
	D.4. Суттєво мінімізує
E. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні затори»	E.1. Не впливає
	E.2. Частково мінімізує
	E.3. Помірно мінімізує
	E.4. Суттєво мінімізує
F. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні аварії»	F.1. Не впливає
	F.2. Частково мінімізує
	F.3. Помірно мінімізує
	F.4. Суттєво мінімізує

Між параметрами МТ, представлених в табл. 1.3 і табл. 1.5 є зв’язки, що описують вплив МТ першого етапу на МТ другого етапу. Наявність або відсутність таких зв’язків представлена в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Матриця наявності або відсутності впливу параметрів табл. 1.3 на параметри табл. 1.5

	A	B	C	D	E	F
1	–	+	–	–	–	–
2	–	+	–	–	–	–
3	+	+	–	–	–	–
4	+	+	–	–	+	+
5	+	+	+	+	+	+
6	+	+	+	+	+	+
7	+	+	–	–	+	–
8	+	+	–	–	+	+

Аналіз зв’язків і взаємозв’язків між параметрами (табл. 1.4, 1.6) дає змогу зменшити навантаження на експертів за рахунок виключення з опитувальних форм питань щодо пар альтернатив, між якими, очевидно, відсутні безпосередні відношення. Таким чином, для побудови морфологічної моделі потрібно близько 200 і 400 питань для першого і другого етапів відповідно.

1.4 Застосування методу BOCR до оцінювання моделей розвитку підземної інфраструктури з урахуванням ризиків

Для держави в умовах обмеженості бюджету постає задача оцінювання важливості, пріоритетності *моделей (альтернативних варіантів) розвитку підземної інфраструктури* міста для подальшого вибору найбільш пріоритетних з них для першочергової реалізації. Ця задача відноситься до слабо структурованих задач підтримки прийняття рішень. Їх особливості, як відомо, полягають у відсутності строго формалізованої цілі функціонування об’єкту керування і, відповідно, оптимального розв’язку в класичному розумінні, а також відсутності детермінованої інформації в обсязі, необхідному для отримання розв’язку.

Задача оцінювання важливості, пріоритетності *моделей (альтернативних варіантів) розвитку підземної інфраструктури* міста характеризується унікальністю, неповнотою, неточністю, нечіткістю вхідної інформації. Для її вирішення можуть застосовуватися математичні методи аналізу ієрархій, вхідна

інформація для яких – це кількісні дані та якісні оцінки експертів. У [24, 43–51] запропоновано методологію та інструментарій підтримки прийняття рішень для розрахунку пріоритетів альтернатив на основі ієрархічних та мережевих моделей критеріїв. Розроблено модифікований метод BOCR до оцінювання альтернатив рішень з урахуванням ризиків.

Розглянемо як ці методи та інструментарій можуть бути застосовані до вирішення задачі оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури міста Києва. Використовуючи матеріали Генерального плану розвитку Києва до 2025 р. [30], оцінки, надані вітчизняними експертами, та досвід зарубіжних країн, будується мережа підтримки прийняття рішень, на основі якої на наступному етапі виконується оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури міста Києва.

1.4.1 Мережа підтримки прийняття рішень для оцінювання пріоритетності моделей розвитку підземної інфраструктури міста Києва

Мережа підтримки прийняття рішень (ППР) представляється у вигляді направленого графу (рис. 1.3):

$$S=\{V, L, E, PCM\},$$

- V – множина вершин графу $V=\{C_1, C_2, ..., C_N\}$ – це множина кластерів $C_i=\{v_{i1}, v_{i2}, ..., v_{in}\}$, де кластери містять окремі елементи задачі ППР. Наприклад, один з кластерів містить *альтернативні варіанти рішень – тунелі*, інший кластер – *характеристики та параметри альтернатив*, за якими відбувається їх оцінювання. В подальшому ці характеристики називатимуться критеріями рішень. У мережі можуть бути кластери з факторами доходів, витрат, можливостей та ризиків (BOCR) від реалізації досліджуваних альтернатив.

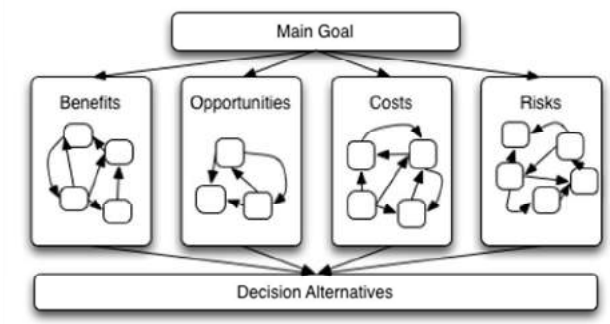


Рисунок 1.3 – Мережа для оцінювання альтернатив рішень з урахуванням доходів, витрат, можливостей та ризиків

- L – множина направлених ребер графу. В мережі є зв'язки двох типів: зовнішні залежності між елементами різних кластерів показують, що елементи одного кластеру впливають на елементи іншого; внутрішні залежності – петлі в графі – показують взаємний вплив між елементами одного кластеру.
- E – множина оцінок елементів графу, наданих експертом в шкалі. Під час порівняння альтернатив рішень відносно доходів і можливостей визначається, яка з альтернатив принесе більший дохід або має більше можливостей. При порівнянні альтернатив рішень відносно витрат і ризиків питання ставиться відносно того, яка з альтернатив є більш витратною або ризикованою.
- PCM – множина обернено симетричних матриць парних порівнянь елементів графу, які будуються на основі експертних оцінок з множини E.

Задача оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури міста Києва зводиться до розрахунку локальних і агрегованих пріоритетів елементів мережі, наведеної на рис. 1.3. Вхідною інформацією для розрахунку пріоритетів слугують кількісні дані та якісні оцінки експертів. В результаті можна отримати агреговані за множиною параметрів пріоритети альтернатив тунелів і вибрати найбільш пріоритетні з них для першочергової реалізації.

1.4.2 Метод BOCR для оцінювання альтернатив тунелів з урахуванням ризиків

Розглянемо застосування модифікованого методу BOCR до оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури міста Києва. Особливості методу в тому, що агреговані пріоритети альтернатив рішень (тунелів) розраховуються за мережею підтримки прийняття рішень з урахуванням факторів доходів, витрат, можливостей і ризиків на основі як точкових, так і нечітких експертних оцінок парних порівнянь; є можливість підвищити узгодженість оцінок експерта щодо елементів мережі без участі експерта; є можливість комплексно оцінити чутливість розв'язків, отриманих на кожному етапі методу.

На першому етапі методу виконується аналіз якості оцінок, отриманих від експерта і представлених обернено симетричними матрицями парних порівнянь (МПП) $\mathrm{D}_{\mathrm{n}\times\mathrm{n}} = \{(\mathrm{d}_{\mathrm{ij}})\}$, $\mathrm{d}_{\mathrm{ij}} > 0$, $\mathrm{d}_{\mathrm{ji}} = 1/\mathrm{d}_{\mathrm{ij}}$ елементів мережі на рис. 1.4. Використовуються алгоритми, які дозволяють оцінити і підвищити узгодженість МПП без участі експерта [45–48], знайти найбільш неузгоджені оцінки експерта. Далі здійснюється коригування МПП з метою підвищення її узгодженості. В окремих випадках експерту зручно представляти оцінки в нечіткому вигляді, наприклад, інтенсивність переваги одного елементу моделі над іншим є близькою до сильної, або знаходиться в інтервалі між слабкою і сильною. Такі оцінки формалізуються за допомогою нечітких МПП $\widetilde{D} = \{(\widetilde{d}_{ij}) \mid i, j = 1,...,n\}$, де нечітка множина $\widetilde{d}_{ij} = (x, \mu_{ij}(x))$ відображає інтенсивність переваги альтернативи a_i над альтернативою a_j, $x \in R$, $\mu_{ij}(x)$ – значення функції приналежності для нечіткого відношення переваги альтернативи a_i над альтернативою a_j, $\widetilde{d}_{ii} = 1$.

В результаті цього етапу для всіх елементів мережі, альтернатив тунелів та параметрів тунелів отримаємо МПП прийнятної якості, які можна використовувати на наступному етапі методу.

На другому етапі розраховуються локальні пріоритети елементів мережі на рис. 1.9 – кластерів та всіх елементів кожного кластеру, включаючи альтернативи тунелів та параметри тунелів. Використовуються відомі методи головного власного вектору (EM), геометричної середньої (RGMM) та інші [24]. Для розрахунку локальних пріоритетів на основі нечітких МПП застосовуються методи, запропоновані в [49]. Оцінювання чутливості ранжувань, побудованих на основі локальних пріоритетів, дозволяє на даному етапі знайти найбільш чутливі елементи МПП, які потребують повторного, більш ретельного експертного оцінювання [50, 51].

Третій етап методу присвячено знаходженню агрегованих пріоритетів елементів мережі на рис. 1.9, включаючи альтернативи тунелів та параметри тунелів. Вибір методу агрегування залежить від типу зв'язків між кластерами у мережі.

Розглянемо частину мережі на рис. 1.9, наприклад, під елементом "ризик", яка має зворотні зв'язки і петлі. Для виконання агрегування будується зважена блочна матриця $\mathrm{WWE} = \{(\mathrm{WWE}_{ji})\}$ локальних пріоритетів елементів всіх кластерів моделі, де $\mathrm{WWE}_{ji} = \mathrm{WE}_{ji} \cdot \mathrm{WC}_{ji}$, $WE_{ji} \geq 0$ – матриця нормованих локальних пріоритетів елементів кластера C_j відносно елементів кластера C_i, WC_{ji} – матриця нормованих ваг кластера C_j відносно кластера C_i, $j,i = 1...,N$. Якщо $I(C_i, C_j) = 0$, то WE_{ji} – нульова матриця. Матриця $\mathrm{WWE} \geq 0$ стохастична за побудовою.

На основі WWE розраховуються граничні пріоритети елементів мережі:

– якщо WWE – примітивна, то шукані пріоритети w – елементи головного власного вектору матриці WWE і розраховуються в результаті граничного переходу

$$\lim_{k \to \infty} \mathrm{WWE}^k = \mathrm{we}^T;$$

– якщо WWE – неприводима, імпримітивна (циклічна), то шуканий вектор пріоритетів – це середнє значення стовбців матриці WWE^k при $k \to \infty$;

Агрегування пріоритетів альтернатив за елементами першого рівня моделі – кластерами доходів, витрат, можливостей і ризиків (див. рис. 1.3) здійснюються за одним з правил:

$$BOCR = B \cdot O/(C \cdot R) \text{ або } BOCR = bB + oO + c/C + r/R$$

$$\text{або } BOCR = bB + oO + (1-c)C + (1-r)R,$$

де b, c, o, r – ваги якостей доходів, витрат, можливостей та ризиків, B, C, O, R – локальні пріоритети альтернатив за цими якостями.

1.4.3 Приклад застосування методу BOCR до оцінювання альтернатив тунелів у місті Києві

Використовуючи оцінки, надані вітчизняними експертами, та досвід зарубіжних країн, побудовано мережу підтримки прийняття рішень для оцінювання альтернатив тунелів у місті Києві (рис. 1.4). У якості альтернатив рішень розглянуто два варіанти тунелів, вказаних у Генеральному плані розвитку Києва до 2025 р., а саме, тунель 1 і тунель 5.

У мережу для оцінювання цих альтернатив тунелів включено наступні основні критерії рішень:

1. Геологічне середовище по трасі тунелів.
2. Характеристики ділянки будівництва.
3. Структурно-функціональні (доцільність будівництва тунелю) і екологічно-безпекові фактори.
4. Фактори ризику.

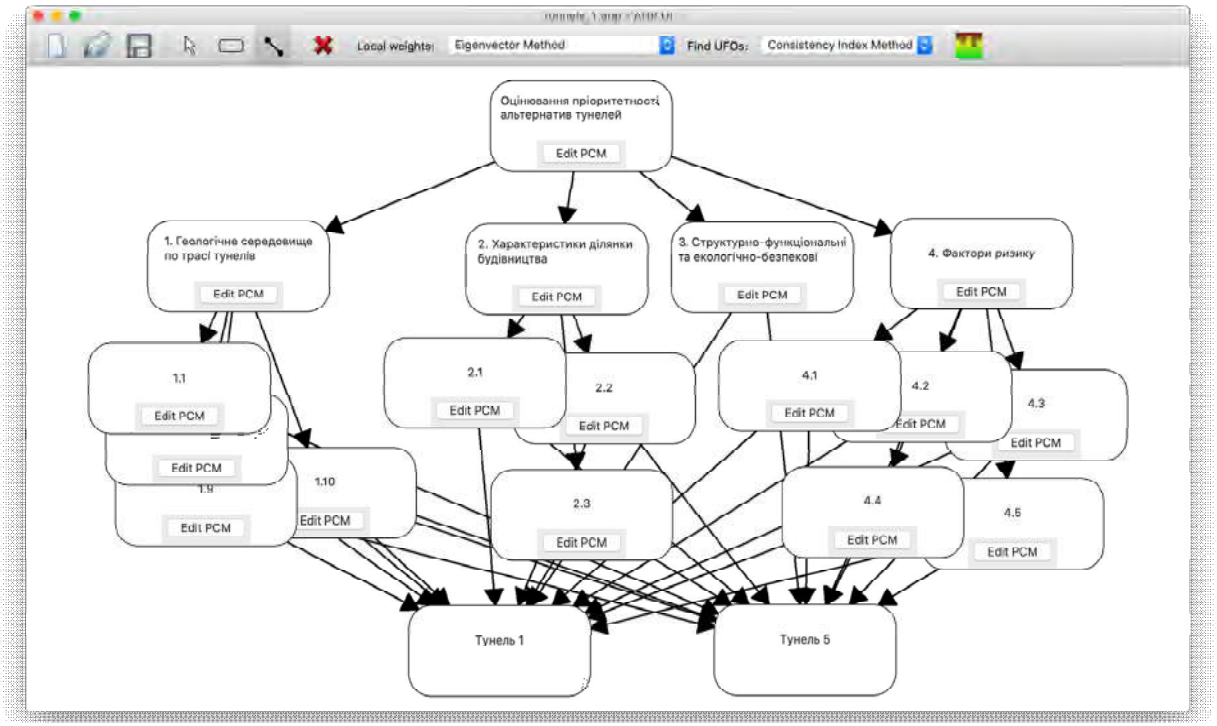


Рисунок 1.4 – Мережа підтримки прийняття рішень для оцінювання альтернатив тунелів у місті Києві

Параметри, які характеризують геологічне середовище по трасі тунелів, в свою чергу, деталізуються на підкритерії рішень:

1.1. Рівень динамічного навантаження.

1.2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови.

1.3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву.

1.4. Вплив існуючих підземних об’єктів.

1.5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів.

1.6. Розрахунковий опір ґрунту.

1.7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки.

1.8. Тип рельєфу і морфометрія.

1.9. Інженерно-геологічні процеси.

1.10. Геотехнології будівництва підземних споруд.

У мережі рішень враховуються наступні характеристики ділянки будівництва:

2.1. Придатність ділянки.

2.2. Масштаб об’єкта.

2.3. Рівень забудови.

Фактори ризику деталізуються наступним чином**:**

4.1. Ризики, пов’язані з ділянкою будівництва.

4.2. Забруднення повітря.

4.3. Шум і динамічні впливи.

4.4. Дорожні затори.

4.5. Дорожні аварії.

Експерт надає оцінки парних порівнянь, використовуючи шкалу Сааті (рис. 1.5 зліва), або безпосередньо вводячи числові значення в матрицю парних порівнянь (рис. 1.6 зліва). Справа на рис. 1.5, 1.6 розраховано значення локальних пріоритетів (ваг) відповідних елементів мережі. Оцінки на рис. 1.5, 1.6 є допустимо неузгодженими, не містять циклів і можуть використовуватися для розрахунку пріоритетів. У випадку оцінок неприйнятної якості, система знаходить найбільш неузгоджений елемент МПП (відмічений червоним кольором на рис. 1.7) і пропонує для нього нове значення (рис. 1.8), яке забезпечує підвищення узгодженості всієї множини оцінок.

Застосування методу оцінювання і підвищення узгодженості МПП до всіх матриць мережі дозволило без участі експерта отримати МПП прийнятної якості та розрахувати локальні пріоритети елементів мережі.

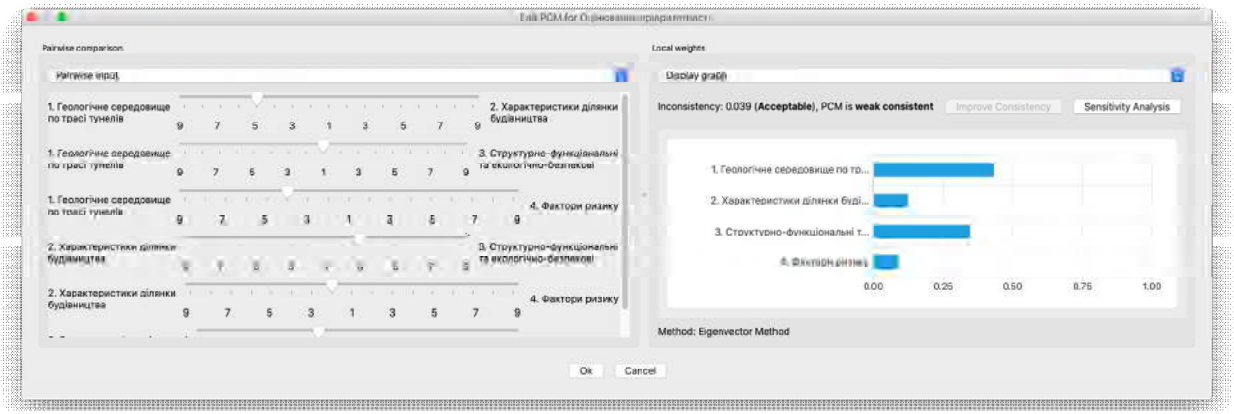


Рисунок 1.5 – Приклад експертного оцінювання критеріїв першого рівня у шкалі

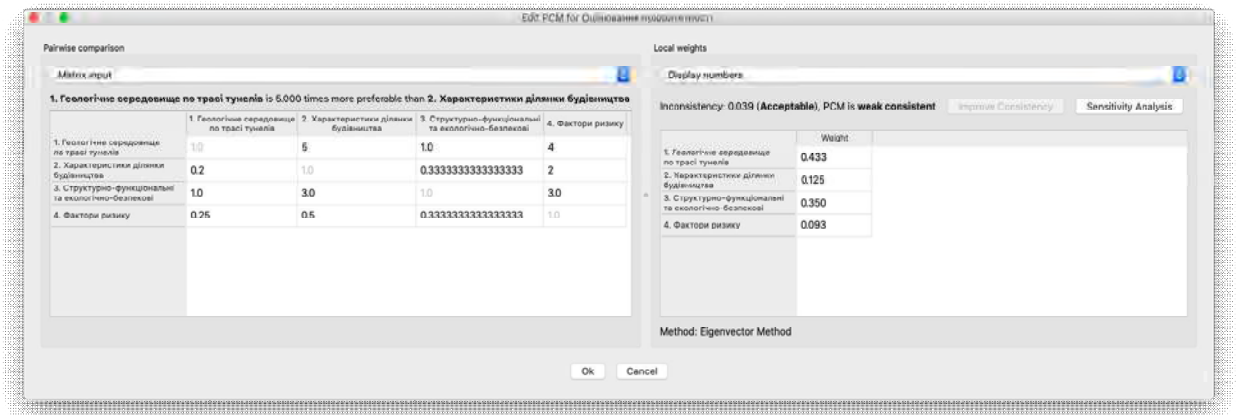


Рисунок 1.6 – Приклад МПП експертного оцінювання критеріїв першого рівня відносно головної цілі

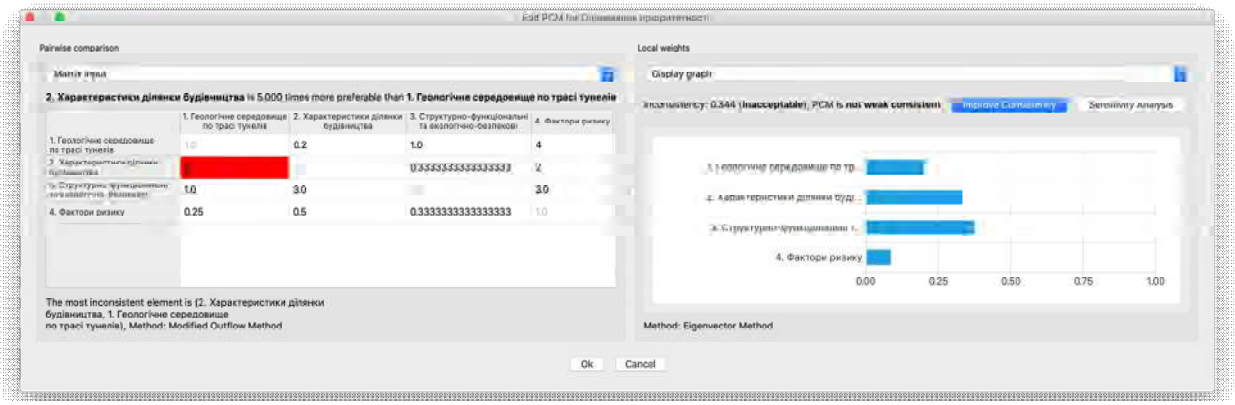


Рисунок 1.7 – Метод оцінювання і підвищення узгодженості МПП критеріїв першого рівня без участі експерта

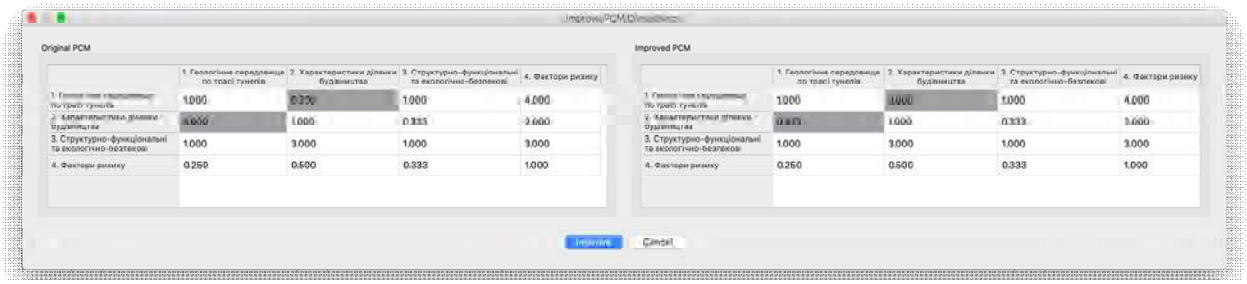
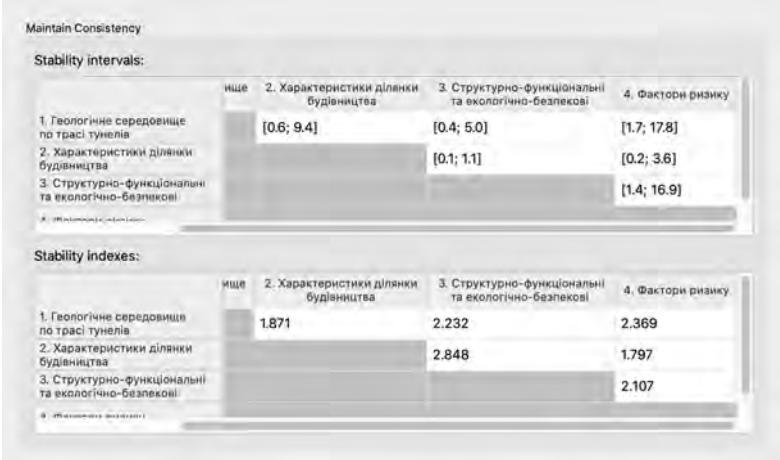
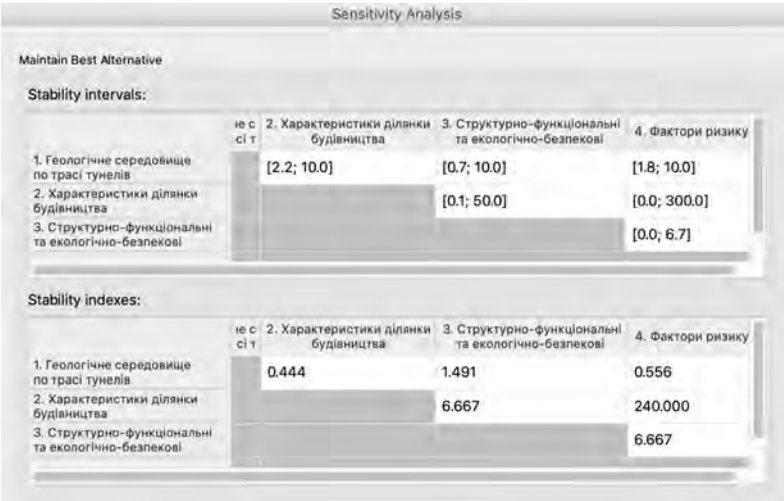


Рисунок 1.8 – Коригування МПП критеріїв першого рівня без участі експерта



а)



б)

Рисунок 1.9 – Оцінювання чутливості ранжування елементів моделі доходів

Після розрахунку локальних пріоритетів елементів моделей в разі необхідності виконується оцінювання чутливості ранжувань, побудованих на

основі цих пріоритетів, до збурень в елементах експертних матриць парних порівнянь. Для фіксованого елемента МПП (оцінки експерта) розраховуються інтервал, в межах якого може змінюватися цей елемент так, щоб неузгодженість всієї множини оцінок експерта залишалася допустимою (рисунок 1.9, а) та інтервали, в межах яких може змінюватися цей елемент так, щоб найкращий елемент або все результуюче ранжування залишалося незмінним (рисунок 1.9, б). Ці інтервали стійкості, а також індекси стійкості дозволяють знайти критичні елементи задачі, які потребують більш ретельного аналізу. Зокрема, найбільш чутливою експертною оцінкою до зміни рівня узгодженості МПП критеріїв першого рівня є d[2,4]=1.797, оскільки ця оцінка характеризується найменшим значенням індексу стійкості (рисунок 1.9, а).

Результатом розрахунку мережі, наведеної на рис. 1.4, є агреговані пріоритети критеріїв, підкритеріїв, ризиків і альтернатив тунелів з урахуванням всіх зв'язків (рис. 1.10). Ці пріоритети використовуються в подальшому для вибору найкращого тунелю і розподілу ресурсів між альтернативами рішень.

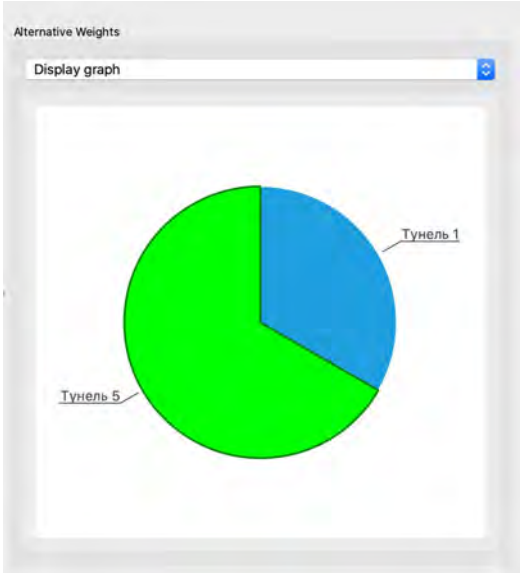


Рисунок 1.10 – Агреговані пріоритети альтернатив тунелів на основі тестових експертних оцінок

Розглянуто застосування модифікованого методу BOCR до оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури міста Києва. Особливості методу в тому, що агреговані пріоритети альтернатив рішень – тунелів розраховуються за мережею підтримки прийняття рішень з урахуванням факторів доходів, витрат, можливостей і ризиків на основі як точкових, так і нечітких експертних оцінок парних порівнянь; є можливість підвищити узгодженість оцінок експерта щодо елементів мережі без участі експерта; є можливість комплексно оцінити чутливість розв’язків, отриманих на кожному етапі методу. В результаті розраховуються агреговані за мережею параметрів пріоритети альтернатив тунелів і можна вибрати найбільш пріоритетну альтернативу тунелів для першочергової реалізації.

1.5 Ідентифікація структурно-функціональних, інженерно-геологічних і техногенних факторів міського середовища в системі наземної та підземної урбаністики та їх зв'язків з групами екологічних і техногенних ризиків методами текстової аналітики з публічних та спеціалізованих джерел

Для вилучення та аналізу факторів різної природи, зокрема, для ідентифікації структурно-функціональних, інженерно-геологічних і техногенних факторів міського середовища в системі наземної та підземної урбаністики та їх зв'язків з групами екологічних і техногенних ризиків, було задіяно розроблений підхід вилучення асоціативних зв’язків з текстів природною мовою на базі відкритих (Open Source) та пропрієтарних комплексів ПЗ, зокрема:

- Скрипти на мові python
    - збір liburl2/librequests;
    - парсінг lxml;
    - лематизація pymorphy2 [52];
    - libgensim (модель Word2Vec) [53];
    - Jupyter Notebook;

- SAS® Content Categorization Studio [54];
- SAS® Content Categorization Server;
- SAS® Content Categorization SDK for Python.

Нижче наведено типовий алгоритм щодо факторів різної природи у задачах системного аналізу:

1. Збір текстів (liburl2, librequests);
2. Очищення корпусу (скрипт на мові python);
3. Лематизація текстів корпусу (pymorphy2);
4. Побудова моделі Word2Vec (libgensim);
5. Вивчення концептів та понять.

Збір текстів новин (liburl2, librequests). Збір даних (у нашому випадку – корпусу текстів) є невід'ємною частиною будь-якого інформаційного процесу.

Для первинного аналізу було використано 7 спеціалізованих галузевих текстів (у тому числі Генеральний план розвитку м. Києва та його приміської зони до 2025 року (проект) [30]), що мають 3967 речень у складі.

Очищення корпусу (скрипт на мові python). Очищення корпусу є дуже важливим кроком. Експериментально було опрацьовано 3 етапи, що надали найбільший результат за найменших витрат процесорного часу для різних корпусів. Ця процедура складається з наступних етапів:

1) Розбиття по розділювачам – поділення тексту на фрагменти;

2) Очищення по довжині – вилучення слів, довжиною менших за 2;

3) Вилучення зайвих букв.

Лематизація текстів корпусу (pymorphy2) з очищенням. У результаті процедури очищення видаляються частини мови, що позначені у табл. 1.6 у графі «видалено». Інші, вказані у таблиці, залишаються.

Таблиця 1.6 – Частини мови, що розпізнає бібліотека pymorphy2

Грамема	Значення	Приклади	Видалено
NOUN	іменник	хом'як	ні
ADJF	прикметник (повне)	хороший	ні
ADJS	прикметник (короткий)	хороший	ні
COMP	компаратив	краще, краще, вище	ні
VERB	дієслово (особиста форма)	кажу, каже, говорив	ні
INFN	дієслово (інфінітив)	говорити, сказати	ні
PRTF	причастя (повне)	прочитав, прочитана	ні
PRTS	причастя (короткий)	прочитана	ні
GRND	дієприслівник	прочитавши, розповідаючи	ні
NUMR	числівник	три, п'ятдесят	ні
ADVB	прислівник	круто	ні
NPRO	займенник-іменник	він	ні
PRED	предікатів	колись	ні
PREP	прийменник	в	так
CONJ	Союз	і	так
PRCL	частинка	б, ж, лише	так
INTJ	вигук	ой	так

Приклад фрагменту обробленого тексту (у вигляді списків слів у реченнях) наведено нижче:

```
['сталии', 'розвиток', 'київ', 'визначаймося', 'збалансовані', 'функціонування',
'забезпечення', 'економічні', 'зростання', 'потреба', 'населення', 'одночасні',
'поліпшення', 'екологічні', 'стан', 'міські', 'середовище', 'ціле', 'раціональні',
'використання', 'ресурс', 'число', 'природні', 'технологічні', 'переоснащення',
'підприємство', 'удосконалення', 'соціальноа', 'виробничоа', 'транспортноа',
'інженерноа', 'інфраструктура', 'поліпшення', 'умова', 'проживання', 'відпочинок',
'оздоровлення', 'збереження', 'збагачення', 'природні', 'ландшафт', 'культурноа',
'спадщина'], ['інвестиціина', 'привабливість', 'зростаймо'], ['тривалі',
'падіння'], ['інвестиції', 'основнии', 'капітал', 'розрахунок', 'душа',
'населення', 'кий', 'зростімо'], ['украіна', 'становімо'], ['будьмо', 'наивищі',
'показник', 'регіон', 'украіна'], ['потужність', 'заклад', 'училище',
'забезпечуймо', 'надання', 'повноа', 'середньоа', 'освіта', 'дитина', 'відповідні',
'віко', 'поглиблення', 'знання', 'зацікавлені', 'первинні', 'професіина',
'підготовка', 'потребуймо'], ['реалізація', 'напрямок', 'сталі', 'розвиток',
'забезпечмо', 'досягнення', 'світові', 'стандарт', 'рівня', 'якість', 'життя',
'населення'], ['мая', 'розвинені', 'потужні', 'вищі', 'школа', 'структура', 'якоа',
'рівень', 'підготовка', 'фахівець', 'повністю', 'відповідаймо', 'потреба',
'динамічні', 'комплекс', 'краіна', 'столиця'], ['досягнення', 'стратегічноа',
'мета', 'реалізація', 'система', 'цілеа', 'основні', 'напрямок', 'перспективні',
'розвиток', 'київ'], ['культурнии', 'потенціал', 'включаймо', 'мережа', 'заклад',
'культура', 'структура', 'потужність', 'якоа', 'знаходьмося', 'рівня',
'європеиські', 'столиця', 'обєкт', 'культурноа', 'спадщина', 'належмо',
'всесвітні', 'памятка', 'історії', 'культура', 'архітектура'], ['забезпечення',
'стіикі', 'зростання', 'економіка', 'основа', 'підвищення', 'рівня', 'життя',
'населення', 'комплексні', 'розвиток'], ['територіальні', 'ресурс', 'забезпечуймо',
```

```
'розміщення', 'практично', 'вид', 'будівництво', 'сучасні', 'межа'], ['будьмо',
'значнии', 'резерв', 'приміщення', 'розміщення', 'ділові', 'установа',
'дозволяймо', 'задовольнити', 'потреба', 'новостворені', 'установа', 'офіс',
'перші', 'етап', 'будівництво', 'нові'], ['промислові', 'зона', 'будьмо'],
['посилення', 'столичні', 'функціи', 'розвиток', 'інфраструктура', 'міжнародноа',
'діяльність'], ['генеральнии', 'план'], ['розвиток', 'економічні', 'комплекс'],
['розвиток', 'ринковоа', 'інфраструктура', 'необхідноа', 'формування',
'забезпечення', 'ефективні', 'функціонування', 'ринковоа', 'економіка']
```

На жаль, відкриті засоби обробки текстів, навіть із застосуваннями власного розробленого набору словників української мови, не такі досконалі, тому серед речень зустрічаються артефакти. Проте вдосконалення словників не є метою цієї роботи.

Побудова моделі Word2Vec (libgensim). Було побудовано та порівняно 6 моделей із різними параметрами фільтрації слів за частотою, довжиною контексту/вікна пошуку, кількістю термінів, кількістю ітерацій пошуку:

1. model1 = Word2Vec(txts, min_count=1)
2. model2 = Word2Vec(txts, min_count=3)
3. model3 = Word2Vec(txts, min_count=10, size=300, iter=50, window=12)
4. model4 = Word2Vec(bitxts, min_count=10) (на основі біграм)
5. model5 = Word2Vec(txt, min_count=30, size=300, iter=50, window=22) (з виключенням додаткових граммем – ['INTJ', 'PRCL', 'CONJ', 'PREP', 'PRED', 'NPRO', None (не визначено)])
6. model6 = Word2Vec(bitxts, min_count=3, size=300, iter=50, window=2) (біграми з виключенням додаткових граммем – ['INTJ', 'PRCL', 'CONJ', 'PREP', 'PRED', 'NPRO', None (не визначено)])

Порівняння моделей проводилося експертним методом виведення асоціацій відносно понять обраного домену. Експерти називали слово і перевірялись слова-асоціації, що їх генерувала модель. Найбільш вдалою (корисною) з точки зору нагадування зв’язаних слів при формуванні таксономій/онтологій виявилась шоста модель model6.

Вивчення концептів та понять. Експериментально було виявлено, що найбільш зрозумілі вихідні словосполучення припадають саме на біграми як

концептуальні поняття. Результати виводу моделі model6 для вивчення асоціацій представлено у табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Деякі результати виводу моделі для вивчення асоціацій і концептів

ПОНЯТТЯ	**АСОЦІАЦІЇ (ВАГИ)**
ТРАНСПОРТНІ_ЗАСІБ	[('резервування', 0.7325636744499207), ('рівня_автомобілізації', 0.7049006223678589), ('паркування', 0.6886059641838074), ('менше', 0.6751060485839844), ('зберігання', 0.6734187602996826), ('постіинога', 0.6668195724487305), ('тимчасові_зберігання', 0.629106879234314), ('розрахунок', 0.6270085573196411), ('легкові_автомобіль', 0.605026125907898), ('вимога', 0.6034138202667236)]
ТУНЕЛЬ	[('вплив_побудова', 0.9952846169471741), ('діоксид_азот', 0.770656943321228), ('економічність', 0.735840916633606), ('повітря', 0.7345056533813477), ('стабілізація', 0.7330552339553833), ('лення', 0.7189959287643433), ('деформація', 0.7173842191696167), ('відповідаймо_вимога', 0.7098426818847656), ('відсутні', 0.7091654539108276), ('існуючии', 0.7089160680770874)]
ПІДЗЕМНІ	[('гаражістоянка', 0.8044840097427368), ('напівпідземні', 0.7562092542648315), ('гараж', 0.7020224332809448), ('наземні', 0.6915863752365112), ('паркінг', 0.6592525243759155), ('тощо', 0.6541709899902344), ('правові', 0.6475299596786499), ('відношення', 0.643531084060669), ('пішохідні', 0.6306630373001099), ('ґрунтові', 0.6259087324142456)]
ГАРАЖ	[('багатоповерхові', 0.848221480846405), ('напівпідземні', 0.7659997940063477), ('гаражістоянка', 0.7259076833724976), ('підземні', 0.7020224928855896), ('порівняно', 0.6970875263214111), ('автостоянка', 0.6680532097816467), ('житлові_будинок', 0.6525247097015381), ('постіинога_зберігання', 0.6516522169113159), ('автотранспорт', 0.6514089107513428), ('легкові_автомобіль', 0.6459072232246399)]
ТРАНСПОРТНІ_ПОТІК	[('рух', 0.742058277130127), ('пішохід', 0.734734058380127), ('стоянка', 0.7142528295516968), ('тимчасові_стоянка', 0.7042959928512573), ('повинні', 0.6843628287315369), ('шум', 0.6592928171157837), ('інтенсивність', 0.6464089751243591), ('позавуличні', 0.6394010186195374), ('викид', 0.620667040348053), ('автотранспорт', 0.610869824886322)]

Основні отримані результати. Досліджено підходи щодо вилучення факторів різної природи, зокрема, для ідентифікації структурно-функціональних, інженерно-геологічних і техногенних факторів міського середовища в системі наземної та підземної урбаністики за рахунок вилучення асоціативних зв'язків.

Наведено типовий алгоритм щодо побудови карти асоціативних зв'язків:

- збір текстів новин (liburl2, librequests);
- очищення корпусу (скрипт на мові python);
- лематизація текстів корпусу (pymorphy2);
- побудова моделі Word2Vec (libgensim) (рис. 1.11);
- вивчення концептів та понять.

```
In [138]:  1 model6.wv.most_similar('тунель')

Out[138]: [('район_потенційні', 0.8840751051902771),
           ('шлях', 0.8761172294616699),
           ('погані', 0.7933022379875183),
           ('година', 0.7702915668487549),
           ('недолік', 0.7536733150482178),
           ('паркінг', 0.7528854012489319),
           ('пішохід', 0.746735692024231),
           ('рух', 0.7187291383743286),
           ('колотротуарні', 0.7165349125862122),
           ('вартість_будівництво', 0.710088849067688)]
```

Рисунок 1.11 – Асоціативні зв'язки моделі

Розроблено підхід щодо побудови асоціативних зв'язків для вилучення факторів різної природи, зокрема, для ідентифікації структурно-функціональних, інженерно-геологічних і техногенних факторів міського середовища в системі наземної та підземної урбаністики.

1.6 Розробка моделі когнітивного моделювання щодо побудови сценаріїв планування розвитку підземної інфраструктури

В слабкоструктурованих задачах, до яких належать задачі планування розвитку підземної інфраструктури, неможливий традиційний математичний (економічний, соціометричний і т.п.) підхід до аналізу процесів розробки

комплексних рішень. Для моделювання складних неформалізованих систем використовується когнітивний підхід, який базується на когнітивних аспектах. Ці аспекти включають в себе процеси сприйняття, мислення, пізнання, пояснення і розуміння. Схематичний, спрощений опис картини світу, що відноситься до проблемної ситуації, зображують у вигляді когнітивної карти. Технологія когнітивного моделювання полягає в тому, щоб на основі когнітивних моделей визначати можливі й раціональні шляхи управління ситуацією з метою переходу від вихідних станів до бажаних. При цьому при когнітивному моделюванні має місце суб'єктивність при наданні вихідних даних по предметній області, що розглядається, у процесі декомпозиції та агрегуванні вершин графа, суб'єктивність у введенні коефіцієнтів вагових дуг графа. Перевагою когнітивної моделі є те, що вона дозволяє бачити як всю картину в цілому, так і деталі, інтегрувати логіку і фантазію, знання і досвід.

Когнітивна модель – це імітаційна модель, яка дозволяє не проводити експеримент на «живій» системі, а моделювати її поведінку і можливе майбутній розвиток під впливом різних факторів, генеруючи нові знання про систему. Це дозволяє обґрунтовувати управлінські рішення в даній ситуації.

Когнітивне моделювання проводиться за наступними етапами:

- Визначення початкових умов, тенденцій, що характеризують розвиток підземного будівництва на даному етапі, необхідне для адекватності модельного сценарію бажаної реальної ситуації, що підсилює довіру до результатів моделювання.
- Задання цільових бажаних напрямків (збільшення, зменшення) і сили (слабо, сильно) зміни тенденцій процесів у ситуації.
- Вибір комплексу заходів (сукупності пов’язаних факторів), визначення їх можливої і бажаної сили і направленості дій (заходів, факторів) на ситуацію, силу і направленість котрих необхідно визначити.

- Вибір спостережуваних факторів (індикаторів), які характеризують розвиток ситуації, здійснюється в залежності від цілей аналізу й бажання користувача.

Проведений аналіз властивостей підземної інфраструктури і розгляд комплексу задач, що виникають при їх вивченні, дозволяє вказати на особливості їх дослідження:

- підземна інфраструктура містить велику кількість різнорідних підсистем з великою кількістю взаємозв'язків – носіїв інформації різного характеру;
- для прийняття рішень щодо цілеспрямованої зміни поводження підземної інфраструктури необхідно вирішувати велику кількість взаємозалежних задач із використанням різних методів як кількісного, так і якісного аналізу, знань й досвіду людини;
- при дослідженні підземної інфраструктури має місце наявність фактору невизначеності та багатофакторних ризиків різної природи.

Ці особливості визначають направленість використання для дослідження підземного будівництва методів та засобів методології системного аналізу.

Сукупність рішень у вигляді конкретного сценарію, що забезпечують цілеспрямовані дослідження підземної інфраструктури на основі когнітивного моделювання, приймається на основі наступного вихідного матеріалу:

- інформації про поточний стан всіх технологічних і організаційних підсистем;
- даних моніторингу;
- рекомендаціях експертної системи при залученні методів якісного аналізу;
- множини заданих або сформульованих ОПР критеріїв і умов техногенних екологічних факторів;
- евристичних знань і припущень групи експертів.

В результаті проведеного порівняльного аналізу систем когнітивного моделювання та системної динаміки, треба відмітити, що основними функціями таких систем є:

- опис ситуації;
- визначення цільових факторів;
- визначення керуючих факторів;
- визначення заходів впливу на ситуацію;
- визначення функціональних зв'язків для побудови когнітивної моделі у вигляді закономірностей у статистичній інформації щодо досліджуваної ситуації, представлення значень у вигляді нечіткої множини, якісних оцінок (експертне оцінювання), приписування значень зі шкали сили зв'язків, законів функціонування;
- визначення тенденцій розвитку ситуацій шляхом проведення імітаційного моделювання;
- розробка стратегій та аналіз їх перспективності в контексті цілей моделювання.

Практично всі системи так, чи інакше виконують однакові функції, однак об'єктивною причиною їх існування є невирішені проблеми:

- вибору та ранжування (виділення базисних та другорядних) факторів на етапі побудови когнітивної карти;
- визначення степені взаємовпливу факторів для приписування вагових коефіцієнтів елементам когнітивної моделі.

Залучаючи основний принцип системного аналізу – декомпозицію, за допомогою якого складна проблема зводиться до формалізованого рівня, виконується процес когнітивного моделювання, який реалізується в інтерактивно-діалоговому режимі. Під когнітивним моделюванням розуміється рішення взаємопов'язаних проблем: побудова когнітивної моделі (карти), обґрунтування

на кожному етапі моделювання стійкості за значенням і по збуренню, структурної стійкості, облік багатофакторних ризиків, невизначеності різної природи.

Когнітивне моделювання починається з розробки когнітивної карти об'єкта. Когнітивна карта – структурна схема причинно-наслідкових зв'язків у системі, яка інтерпретує судження і погляди ОПР – будується для того, щоб зрозуміти і проаналізувати поведінку складної системи.

Нехай підземна інфраструктура, що розглядається, складається з множини V окремих елементів. Два елементи системи V_i та V_j на схемі можуть бути зображені як окремі точки-вершини, і якщо елемент V_i зв'язаний з елементом V_j причинно-наслідковим зв'язком, то їх з'єднують орієнтованою дугою. Цілком можливо, що наслідки можуть бути причиною зміни інших факторів. Причинно-наслідкові ланцюжки можуть бути достатньо довгими і складними. Аналіз причинно-наслідкових зв'язків необхідний, наприклад, для прогнозу розвитку ситуації, реалізації різних управлінь процесами в системі. Після побудови схем причинно-наслідкових зв'язків визначаються стратегії прийняття рішень в даній предметній області.

В результаті когнітивної структуризації відбувається розробка неформального опису знань про предметну область, котру можна наглядно зобразити у вигляді схеми, графа, матриці, а також таблиці чи тексту [18].

У дослідженні проблеми обґрунтування вибору придатності земельної ділянки для підземного будівництва на першому етапі були використані когнітивні моделі типу когнітивної карти - знакового орієнтованого графа (1.1) і функціонального графа у вигляді зваженого знакового орграфа (1.2)

$$G = \langle V, E \rangle, \tag{1.1}$$

де: V – множина вершин $V_i \in V, i = 1,2,...k$, які є елементами досліджуваної системи; E – множина дуг $e_{ij} \in E$; $i, j = 1,2,...N$, які відображують взаємозв'язок між вершинами V_i і V_j; вплив V_i на V_j може бути позитивним (знак «+» над

дугою), коли збільшення (зменшення) одного фактора приводить до збільшення (зменшення) іншого, від'ємним (знак «-» над дугою), коли збільшення (зменшення) одного фактора веде до зменшення (збільшення) другого, чи бути відсутнім (0).

Векторний функціональний граф

$$\Phi = \left\langle G, X, F\left(X, E\right), \theta \right\rangle,$$

де G – когнітивна карта; X – множина параметрів вершин, Θ – простір параметрів вершин; $F(X,E)$ – функціонал перетворення дуг. Якщо

$$F(X,E) = F(x_i, x_j, e_{ij}) = \begin{cases} +\omega_{ij}, & \begin{matrix} \textit{если рост (падение) } x_i \textit{ влечет} \\ \textit{за собой рост(падение) } x_j; \end{matrix} \\ -\omega_{ij}, & \begin{matrix} \textit{если рост (падение) } x_i \textit{ влечет} \\ \textit{за собой падение(рост) } x_j; \end{matrix} \end{cases} \tag{1.2}$$

то має місце зважений знаковий орграф, де ω_{ij} – ваговий коефіцієнт.

Модель складної системи у вигляді ієрархічної когнітивної карти можна представити у вигляді

$$IG = \left\langle G_k, G_{k+1}, E_k \right\rangle, \quad k \geq 2, \quad G_k = \left\langle v_i(k), e_{ij}\{k\} \right\rangle,$$

де G_k – когнітивна карта k-рівня; $V(1) = \{v_i(1)\}$ – множина вершин нижнього (1-го) рівня, $V(k) = \{v_i(k)\}$ – множина вершин k-рівня (рис. 1.12). Відносини між вершинами одного рівня – дуги $e_{ij}(k), E(k) = \{e_{ij}(k)\}$; відносини між вершинами різних рівнів – $e_{k,k+1}, E_k = \{e_{k,k+1}\}$.

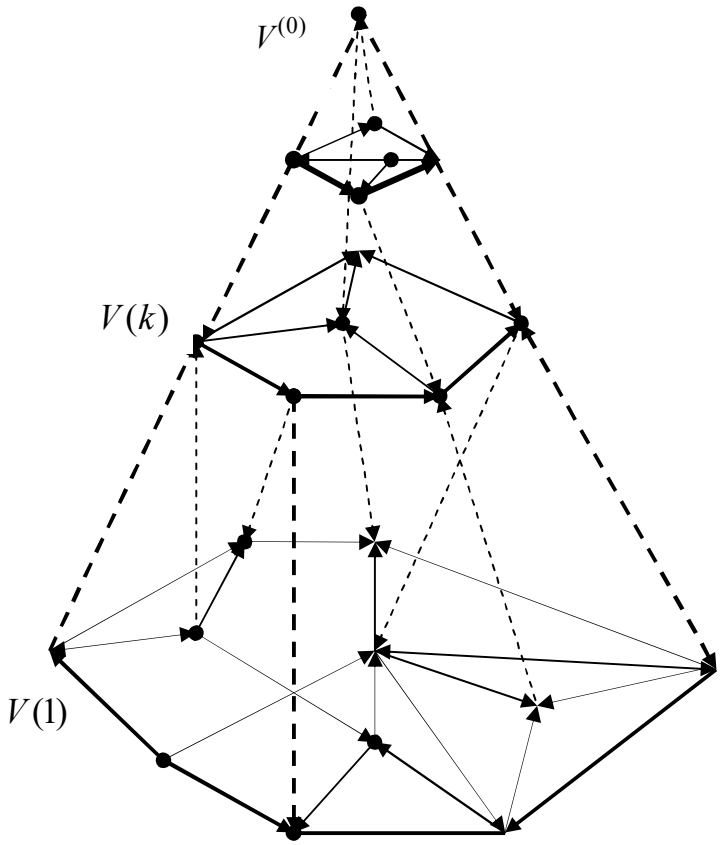


Рисунок 1.12 – Структура складної системи у вигляді ієрархічної когнітивної карти

Когнітивна карта G, окрім графічного зображення, може бути представлена матрицею відношень A_G.

Матриця A_G – це квадратна матриця, рядки й стовпчики якої помічені вершинами графа A_G, а на перетині *i*-го рядка, *j*-го стовпчика стоять (або ні) одиниці, якщо існує (не існує) відношення між елементами V_i та V_j, тобто

$$A_G = \left[a_{ij}\right],\ a_{ij} = f(v_i, v_j),\ i, j = 1,2,...n, \tag{1.3}$$

де $f(v_i, v_j)$ – вагова функція, яка приймає значення [–1;1]. Вона дорівнює 0, якщо між вершинами V_i та V_j немає зв'язку. В більш простому випадку a_{ij} приймає значення «+1», «–1» або «0».

На другому етапі когнітивного моделювання для дослідження властивостей когнітивної моделі використовувалися методи аналізу структурної стійкості і стійкості до збурень [55–57], методи аналізу зв'язності моделі (симпліціального аналіз) [58, 59], методи теорії графів [57]. Результати аналізу зіставлялися з наявною інформацією про підземне будівництво.

На третьому етапі когнітивного моделювання для визначення можливого розвитку процесів в складній системі і розробки сценаріїв розвитку була використана модель імпульсного процесу (моделювання розповсюдження збурень на когнітивних моделях) [57]:

$$x_{v_i}(n+1) = x_{v_i}(n) + \sum_{v_j : e = e_{ij} \in E}^{k-1} f(x_i, x_j, e_{ij}) P_j(n) + Q_{vi}(n). \qquad (1.4)$$

де $x(n)$, $x(n+1)$ – величини показника у вершині V_i при кроках імітації в момент $t = n$ і наступним за ним $t = n+1$; $P_j(n)$ – імпульс, який був у вершині V_j в момент $t = n$; $Q_{Vi}(n) = \{q_1, q_2, \ldots, q_k\}$ – вектор зовнішніх імпульсів (збурюють або керуючих впливі), внесених у вершини V_i в момент часу n.

Когнітивне моделювання базується на сценарному підході. Сценарій – це сукупність тенденцій, котрі характеризують ситуацію в даний момент, бажані цілі розвитку, комплекс заходів, що впливають на розвиток ситуації, системи спостереження параметрів, котрі ілюструють поведінку процесів.

Сценарій може моделюватися по трьох основних напрямках:

1. прогноз розвитку ситуації без будь-якої дії на процеси: ситуація розвивається сама по собі (еволюційний розвиток);
2. прогноз розвитку ситуації за вибраним комплексом заходів-управлінь (пряма задача);
3. синтез комплексу заходів для досягнення необхідних змін стану ситуації (зворотна задача).

1.7 Побудова обчислювального алгоритму когнітивного моделювання

Для обґрунтованої реалізації альтернативи сценарію залучається когнітивне моделювання, що дозволяє на підставі знання і досвіду побудувати причинно-наслідкові зв'язки, зрозуміти і проаналізувати поведінку складної системи на стратегічну перспективу при великій кількості взаємозв'язків і взаємозалежностей.

З наведених у попередньому підрозділі теоретичних засад когнітивного моделювання випливає, що процес моделювання починається з розроблення моделі когнітивної карти, з розроблення когнітивної карти об’єкта [29, 60–67].

Було запропоновано обчислювальний алгоритм та створено програмний модуль побудови та аналізу когнітивної моделі зі зручним та простим користувацьким інтерфейсом. Обчислювальний алгоритм та програмний модуль передбачають перевірку структурної стійкості, стійкості за початковим значенням та за збуренням, яка наводиться одразу після завантаження файлу матриці суміжності. Для визначення структурної стійкості використовується критерій відсутності парних циклів (всі цикли і їх тип зображуються у вікні). Для визначення стійкості за початковим значенням та за збуренням використовується критерій Ляпунова, тобто система є стійкою за початковим значенням якщо $\max|\lambda_i|<1$ та за збуренням, якщо $\max|\lambda_i|\leq 1$, де λ_i – власні числа матриці зв’язності.

При аналізі когнітивної карти процедура отримання структурної стійкості виконується шляхом виділення в ній парних і непарних циклів. Парний цикл (позитивний зворотній зв'язок) має позитивний добуток знаків всіх вхідних у нього дуг, непарний (негативний зворотній зв'язок) – негативний. Парний цикл є найпростішою моделлю структурної нестійкості, так як будь-яка початкова зміна параметру в будь-якій його вершині призводить до необмеженого росту модуля параметрів вершин циклу. Будь-яка зміна параметра будь-якої вершини непарного циклу призводить лише до осциляції параметрів вершин.

Наведемо процедуру структурної стійкості.

- На початку процедури знаходяться усі парні цикли:

$$v_{11} \to \ldots \to v_{1i_1} \to \ldots \to v_{1n_1}$$

$$\ldots$$

$$v_{i1} \to \ldots \to v_{ii_1} \to \ldots \to v_{in_1}$$

$$\ldots$$

$$v_{l1} \to \ldots \to v_{li_1} \to \ldots \to v_{ln_l}$$

- Знаходиться найбільш повторюваний фактор у циклах

$$v_m : \max\left(count(v_m \in \{v_{i1} \to \ldots \to v_{in_i}\})\right)$$

- Знайдений фактор даних розбивається на 2 некорельовані підфактори.

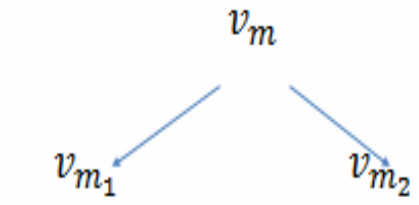


Рисунок 1.13 – Розбиття фактору даних на два корельованих підфактори

Розбиття відбувається на основі залучення процедури інтегрованого показника даних. Повертаємося на 1-й етап.

Алгоритм застосовується для кожної вершини графу. Вершину, для якої застосовується алгоритм, позначимо *X*. Шлях позначимо *P*. Множину знайдених циклів позначимо *S*.

Крок 0. Перевіряємо, чи є в шляху *P* цикли. Якщо там наявні цикли, то ця гілка обрізається, а цикл записується у множину циклів *S*.

Крок 1. Шукаємо всі вершини, до яких є шлях з вершини X. Позначимо їх x_i. Виконуємо наступні кроки для кожної x_i.

Крок 2. Перевіряємо, чи є цикл, що починається зі шляху *X*-> x_i. Якщо такого немає, переходимо на Крок 3, в іншому випадку ця гілка обрізується.

Крок 3. Виконуємо Крок 0 для вершини x_i_та шляху (P-> x_i).

Алгоритм зображено блок-схемою, що наведена на рис. 1.14.

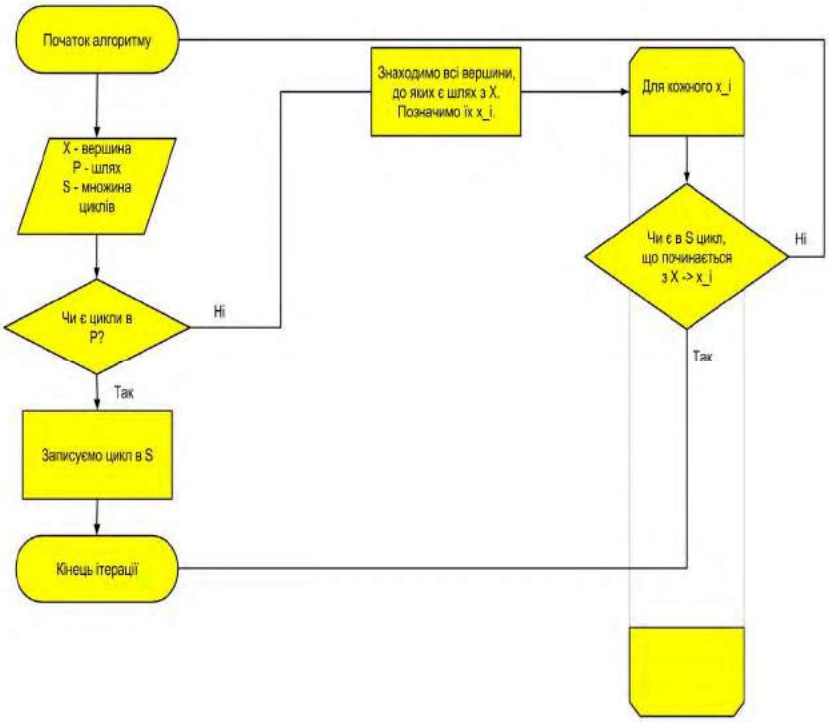


Рисунок 1.14 – Блок-схема процедури отримання структурної стійкості

У створеному програмному модулі реалізовано наступні можливості обробки даних: завантаження та збереження файлів з даними, додавання та видалення вершин графу, а також зміна зв’язків між наявними вершинами, проведення процедур чисельної та структурної стійкості [67].

Для побудови когнітивної моделі у вигляді графу, необхідно натиснути «Файл» і «Відкрити», після чого вибрати файл, в якому збережена матриця суміжності.

Для більш детального представлення обчислювального алгоритму та програмного модуля розглянемо процедуру когнітивного моделювання на прикладі побудови стійкої ділянки для будівництва. В результаті обробки експертної інформації за допомогою наступні характеристики підземної інфраструктури, які були умовно поділені на наступні категорії: базові фактори, збуджуючі фактори, керуючі фактори – потенційно можливі важелі, фактори-наслідки, індикатори – наслідки, які відображують і пояснюють розвиток підземного будівництва.

Базові фактори:

V3 – Показник статичного навантаження навколишнього ґрунтового масиву

V5 – Генетичний тип і літологічний склад ґрунтів

V6 – Розрахунковий опір ґрунту

V8 – Тип рельєфу і морфометрія

Збуджуючі фактори:

V1 – Рівень динамічного навантаження

V2 – Показник статичного навантаження від поверхневої забудови

V4 – Вплив існуючих підземних об'єктів

V7 – Вплив водоносних горизонтів і повеней

V9 – Інженерно-геологічні процеси

Керуючі фактори:

V10 – Геотехнологій будівництва підземних споруд

Звісно, можливі інші варіанти групування факторів за категоріями. Проте, на нашу думку, таке групування є досить зручним для аналізу загальних тенденцій і процесів в даній сфері. Після когнітивної структуризації здійснюється розробка неформального опису знань про предметну область, котру можна наглядно зобразити у вигляді схеми, графа, матриці, а також таблиці чи тексту. На основі даних експертного оцінювання та визначеного сценарію розвитку сформовано матрицю суміжності моделі об’єкту, що наведена у табл. 1.8.

Після когнітивної структуризації здійснюється розробка неформального опису знань про предметну область, котру можна наглядно зобразити у вигляді схеми, графа, матриці, а також таблиці чи тексту. Наведемо на рис. 1.15 графічне представлення когнітивної карти (біля кожної вершини вказаний номер, який відповідає номеру фактора; біля кожної дуги вказана її вага; синя дуга – позитивний зв’язок, червона – негативний).

Таблиця 1.8 – Матриця суміжності моделі об’єкту

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11
V1	0	0	0	1	0	0	0	0	–1	1	0
V2	0	0	0	1	0	–1	0	0	–1	1	1
V3	0	0	0	1	0	–1	0	1	–1	1	0
V4	–1	0	0	0	0	–1	0	0	1	–1	1
V5	1	0	1	0	0	1	0	0	–1	0	0
V6	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V7	0	0	0	0	0	–1	0	1	–1	0	1
V8	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
V9	1	0	0	0	0	–1	0	0	0	0	0
V10	–1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
V11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

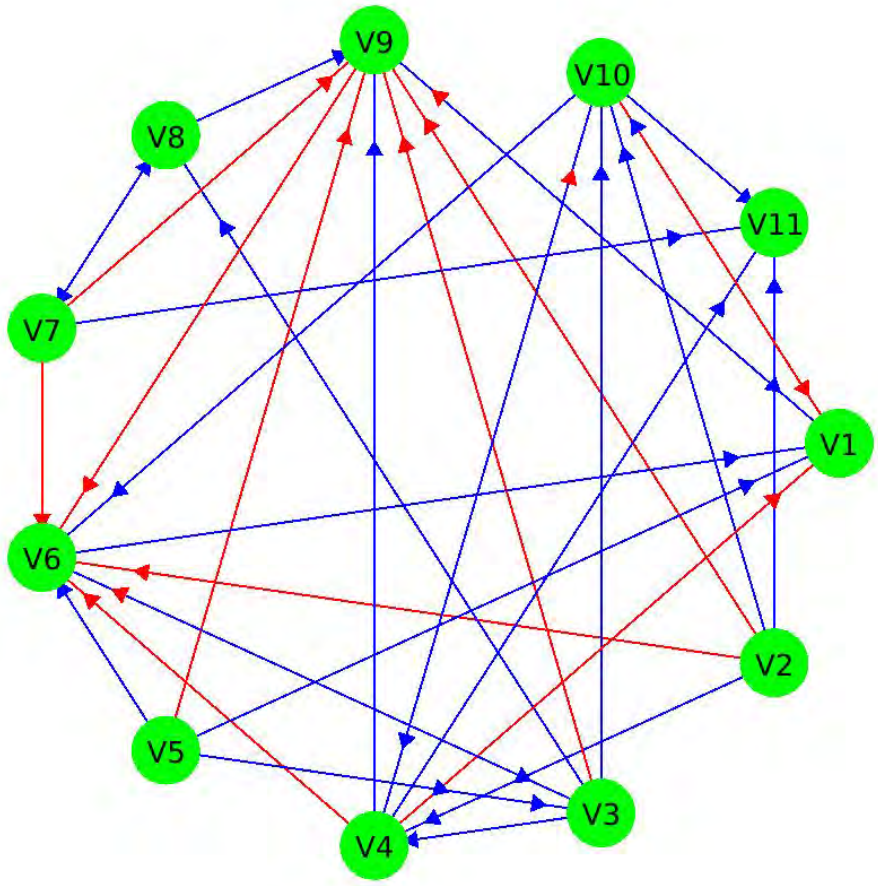


Рисунок 1.15 – Представлення когнітивної карти у вигляді зваженого орієнтовного графу

Для оцінки стійкості розвитку об’єкту дослідження приймається наведена в [67] система критеріїв. При дослідженні стійкості зваженого орієнтовного графа – когнітивної карти – досліджується стійкість за значенням і стійкість по збуренню

системи в міру її еволюції. Структурна стійкість системи може бути встановлена шляхом аналізу циклів когнітивної карти.

Для безпосередньої перевірки стійкості когнітивної карти було реалізовано програмний продукт на мові програмування C++, з використанням бібліотек: Qt та Eigen. Після передачі на аналіз текстового файлу із матрицею суміжних відношень, програма відображає цю матрицю, будує графічне зображення когнітивної карти, виконує аналіз когнітивної карти на структурну стійкість, стійкість по збуренню та стійкість за початковим значенням.

1.8 Розробка сценаріїв мінімізації ризиків урбаністичних територій при створенні підземної інфраструктури

Проведемо когнітивне моделювання обґрунтування вибору придатності земельної ділянки для підземного будівництва тунелю. Для обґрунтованої реалізації альтернативи сценарію, отриманого на етапі морфологічного аналізу, залучається когнітивне моделювання, що дозволяє на підставі знання і досвіду побудувати причинно-наслідкові зв'язки, зрозуміти і проаналізувати поведінку складної системи на стратегічну перспективу при великій кількості взаємозв'язків і взаємозалежностей [29, 64–67]. При дослідженні даної проблеми при залученні результатів, отриманих в процесі передбачення, будуються когнітивні моделі типу когнітивної карти – знакового орієнтованого графа і функціонального графа у вигляді зваженого знакового орграфа. Для дослідження властивостей когнітивної моделі використовуються методи аналізу структурної стійкості і стійкості до збурень, методи аналізу зв'язності моделі (симпліціальний аналіз), методи теорії графів [57, 60, 67]. Для визначення можливого розвитку процесів в складній системі і розробки розвитку сценаріїв планування розвитку інфраструктури мегаполісу залучається модель імпульсного процесу.

Розглянемо всі кроки моделювання поступово.

Перший етап. *Розробка когнітивної моделі.* При розробці когнітивної моделі було застосовано принцип послідовного уточнення моделі: спочатку було побудовано когнітивну карту (1.1), потім на її основі будується модель зваженого знакового ортографу (1.2). Наведемо етапи побудови когнітивної карти (1.1).

При розробці когнітивної моделі зручно представляти проаналізовану і систематизовану інформацію про вершини у вигляді табл. 1.9.

Таблиця 1.9 – Вершини когнітивної карти G1

Код	**Назва вершин**	**Призначення** вершин
V1	Рівень динамічного навантаження	збурююча
V2	Показник статичного навантаження від поверхневої забудови	збурююча
V3	Показник статичного навантаження навколишнього ґрунтового масиву	базова
V4	Вплив існуючих підземних об'єктів	збурююча
V5	Генетичний тип і літологічний склад ґрунтів	базова
V6	Розрахунковий опір грунту	базова
V7	Вплив водоносних горизонтів і повеней	збурююча
V8	Тип рельєфу і морфометрія	базова
V9	Інженерно-геологічні процеси	збурююча
V10	Геотехнологій будівництва підземних споруд	керуюча
V11	Стійкість ділянки	індикативна, цільова

Для матриці суміжності, що наведено у табл. 1.8, приведемо розрахунки когнітивної карти на структурну і чисельну стійкість (рис. 1.16).

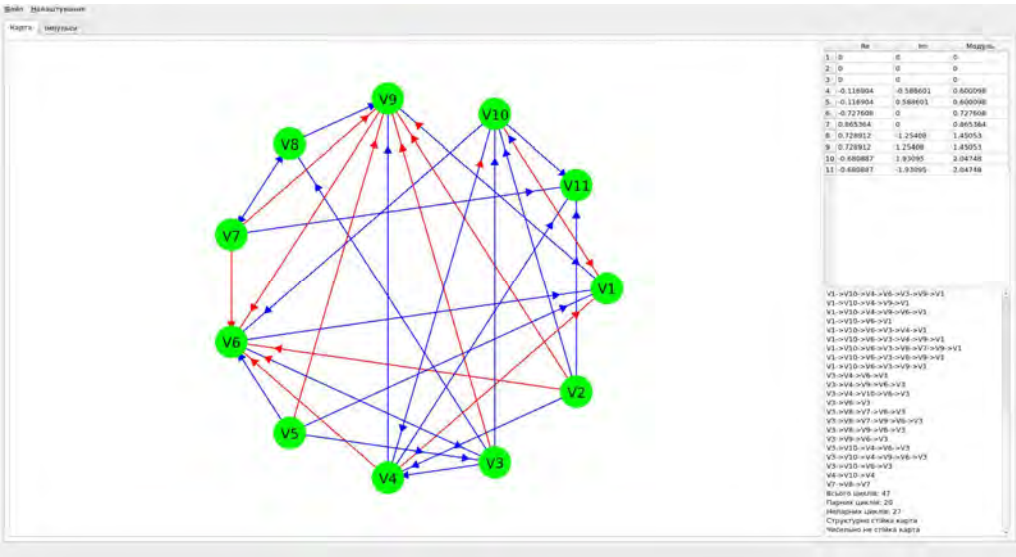


Рисунок 1.16 – Дослідження когнітивної карти на структурну і чисельну стійкість

Аналіз циклів когнітивної карти показав, що в цій системі міститься 47 циклів, серед них – 20 циклів позитивного (підсилюючого) і 27 циклів негативного (стабілізуючого) зворотного зв'язку. Це свідчить про те, що аналізована система структурно стійка. Оцінка цього факту як «хороший» чи «поганий» неоднозначна, може залежати як від цілей управління, так і від «переваг» ОПР, яка може модернізувати початкову когнітивну карту.

Для аналізу стійкості до збурень використаний критерій стійкості |M| <1, де |M| – це максимальне по модулю власне число матриці G1. Оскільки в даному випадку |M| = 2,04748 > 1 (рисунок 1.16), то система G1 не стійка ні до збурення, ні за початковим значенням. Це свідчить про те, що найменші відхилення в вершинах виводять систему зі стійкого стану.

Другий етап. *Аналіз властивостей когнітивної карти G1.*

Аналіз властивостей когнітивної карти G1 включає: визначення характеристик графа, аналіз шляхів і циклів, аналіз стійкості до збурень і структурної стійкості. Визначення різних шляхів з вершини в вершину на когнітивній карті дозволяє осмислювати, наскільки обґрунтовано визначені причинно-наслідкові ланцюжки досліджуваної когнітивної карти «Підземне будівництво», в якій задані основні характеристики призначеного для підземного будівництва тунелю. Аналіз шляхів дозволяє інтерпретувати сенс шляхів – причинно-наслідкових ланцюжків, використовувати інформацію надалі для підтримки прийнятих рішень. Крім того, шляхи показують різноманіття можливостей досягнення цілей, їх кількість може бути великою і далеко не очевидним для особи, яка приймає рішення. Також стає наочним, які вершини включені в кожен шлях, «зачіпаються» на цьому шляху, що дає привід для оцінки його бажаності або не бажано.

Третій етап. *Імпульсне моделювання, аналіз сценаріїв.*

За допомогою розробленого обчислювального алгоритму, наведеного в п. 1.6, можливе внесення за формулою (1.4) збурень $Q=\{q_i\}$, $i = 1,2,\ldots k$ різної

величини (нормованої) в будь-яку з вершин, а також в їх комбінацію. Перед початком імпульсного моделювання необхідно розробити план обчислювального експерименту. При внесенні збурень у вершини шукається відповідь на питання: «А що буде, якщо ...?». В процесі імпульсного моделювання можливо вносити впливи на будь-якому такті моделювання. Це дає можливість змінювати (корегувати) сценарії в модельній динаміці, визначати впливи, які наближають процеси до бажаних. Наведемо деякі варіанти експерименту.

Сценарій №1. Нехай геотехнології будівництва підземних споруд удосконалюються, імпульс q_{10} = +1 вводиться в вершину V_{10}, вектор збурень Q_1={ q_1 = 0; q_2 = 0; … q_{10} = +1}.

Результати розрахунків імпульсних процесів в вершинах по формулі (1.4) на 10 кроках моделювання, число яких в даному випадку можна вважати достатнім, тому що тенденції розвитку ситуацій в системі вже проявилися. На рис. 1.17 зображені графіки імпульсних процесів в вершинах, побудованих за даними табл. 1.9.

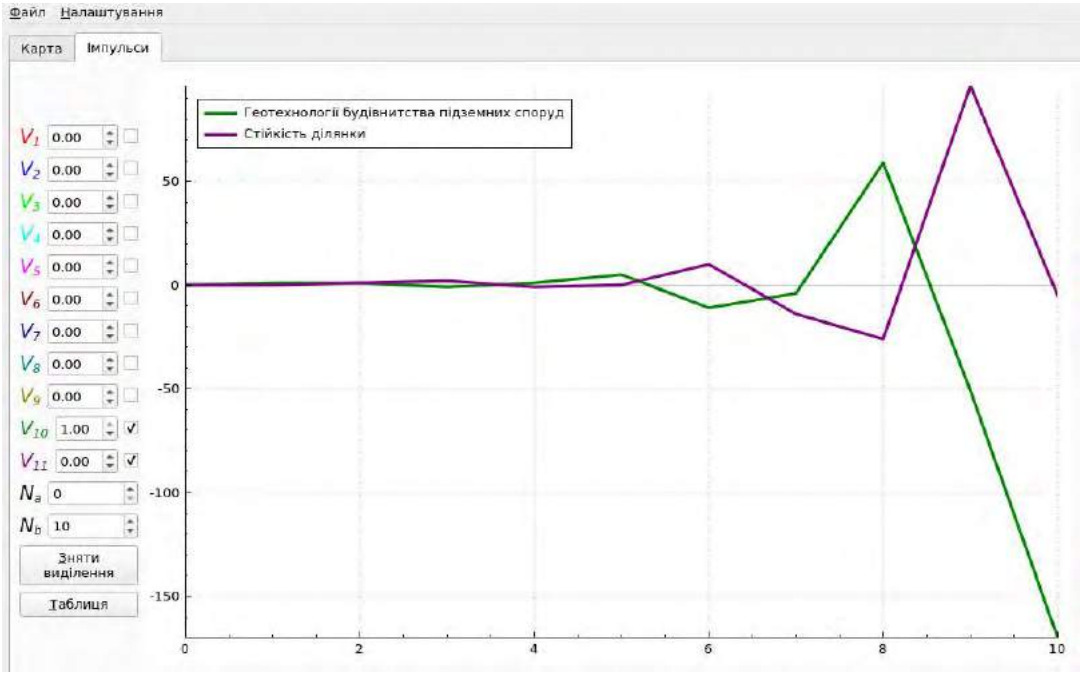


Рисунок 1.17 – Графіки імпульсних процесів за сценарієм 1

Моделювання сценарію №1 показало, що в разі моделі системи, представленої у вигляді когнітивної карти G1, процеси в ній будуть розвиватися в наростаючому коливальному режимі при передбачуваній зміні у вершині V_{10}.

Розглянемо ще один сценарій.

Сценарій №2. Нехай відбувається порушення чотирьох вершин: спостерігається негативний вплив на систему статичного навантаження від поверхневої забудови (q_2 = –1) і існуючих підземних об'єктів (q_4 = –1), але інженерно-геологічні процеси і геотехнології будівництва підземних споруд передбачаються позитивними (q_9 = +1 и q_{10} = +1); вектор збурень Q_2={0;… $q_2 = -1$;..$q_4 = -1$;…$q_9 = +1$; $q_{10} = +1$}.

Результати розрахунків наведені на рис. 1.18, 1.19.

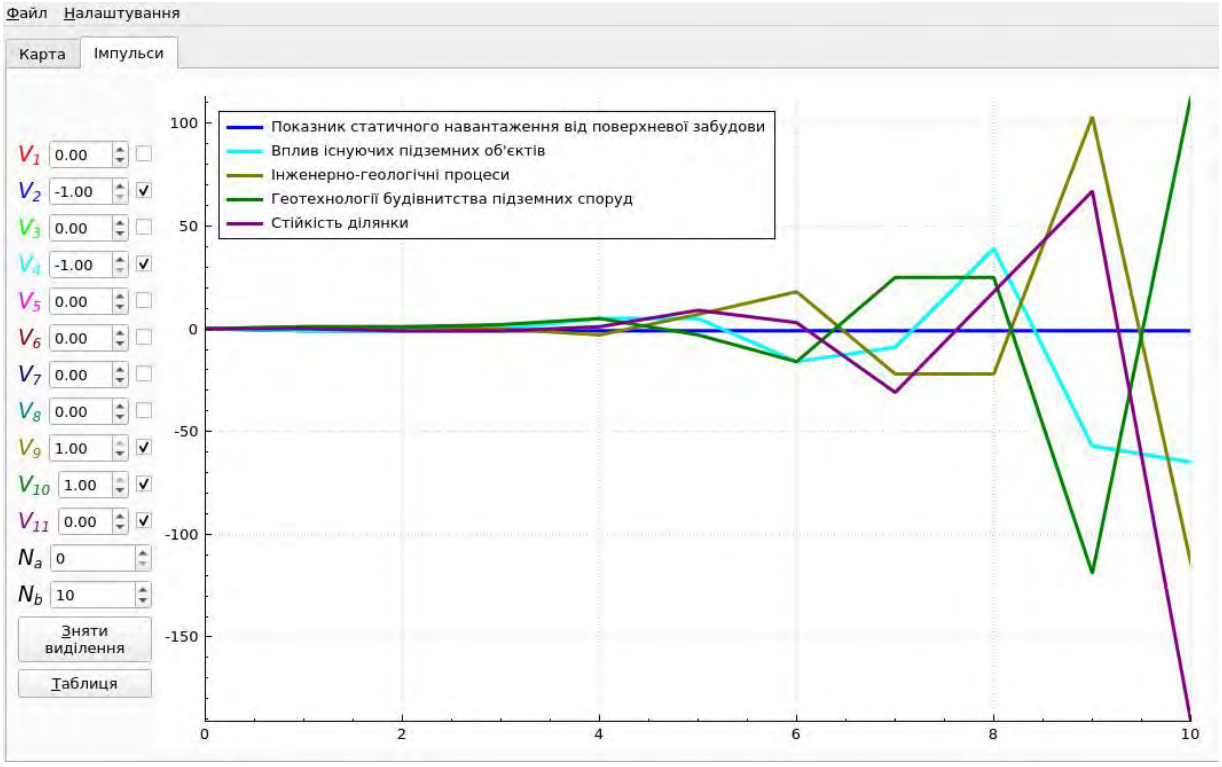


Рисунок 1.18 – Графіки імпульсних процесів за сценарієм 2

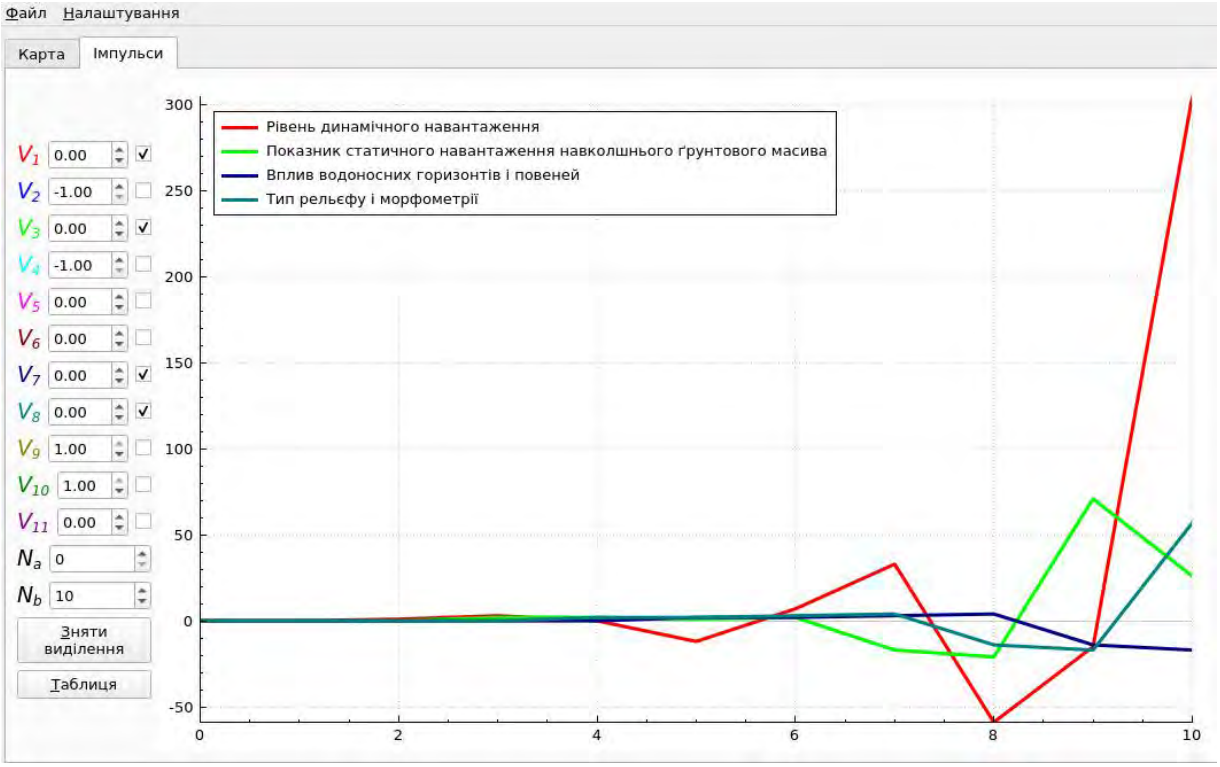


Рисунок 1.19 – Графіки імпульсних процесів за сценарієм 2

Аналізуючи результати сценарного моделювання №2, бачимо, що спостерігається такий саме характер наростаючих коливальних процесів, як і за сценарієм №1. Модель G1 виявляється імпульсно нестійкою, що слід також з попередніх результатів дослідження когнітивної карти G1 на стійкість до збурень. Але модель G1 стійка структурно, а її нестійкість до збурень може бути викликана тим, що всі відношення a_{ij} (1.3) однакові, рівні одиниці. Це може не відповідати дійсності.

В продовження досліджень було проведене експертне опитування, за допомогою якого були встановлені вагові коефіцієнти дуг. Переходимо до розробки когнітивної моделі зваженого орієнтованого графу Ф за формулами (1.3), (1.4). Матриця суміжності зваженого орієнтованого графу Ф наведена у таблиці 1.10, а відповідна когнітивна карта з дослідженням її властивостей на чисельну та структурну стійкість наведена на рис. 1.20.

Таблиця 1.10 – Матриця суміжності зваженого орієнтованого графу Ф

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11
V1	0	0	0	0.6	0	0	0	0	–0.7	0.4	0
V2	0	0	0	0.2	0	–0.3	0	0	–0.6	0.7	1
V3	0	0	0	0.1	0	–0.5	0	0.4	–0.6	0.7	0
V4	–0.2	0	0	0	0	–0.5	0	0	0.6	–0.7	1
V5	0.4	0	0.5	0	0	0.3	0	0	–0.2	0	0
V6	0.2	0	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
V7	0	0	0	0	0	–0.4	0	0.6	–0.6	0	1
V8	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0.2	0	0
V9	0.7	0	0	0	0	–0.3	0	0	0	0	0
V10	–0.7	0	0	0.9	0	0.5	0	0	0	0	1
V11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

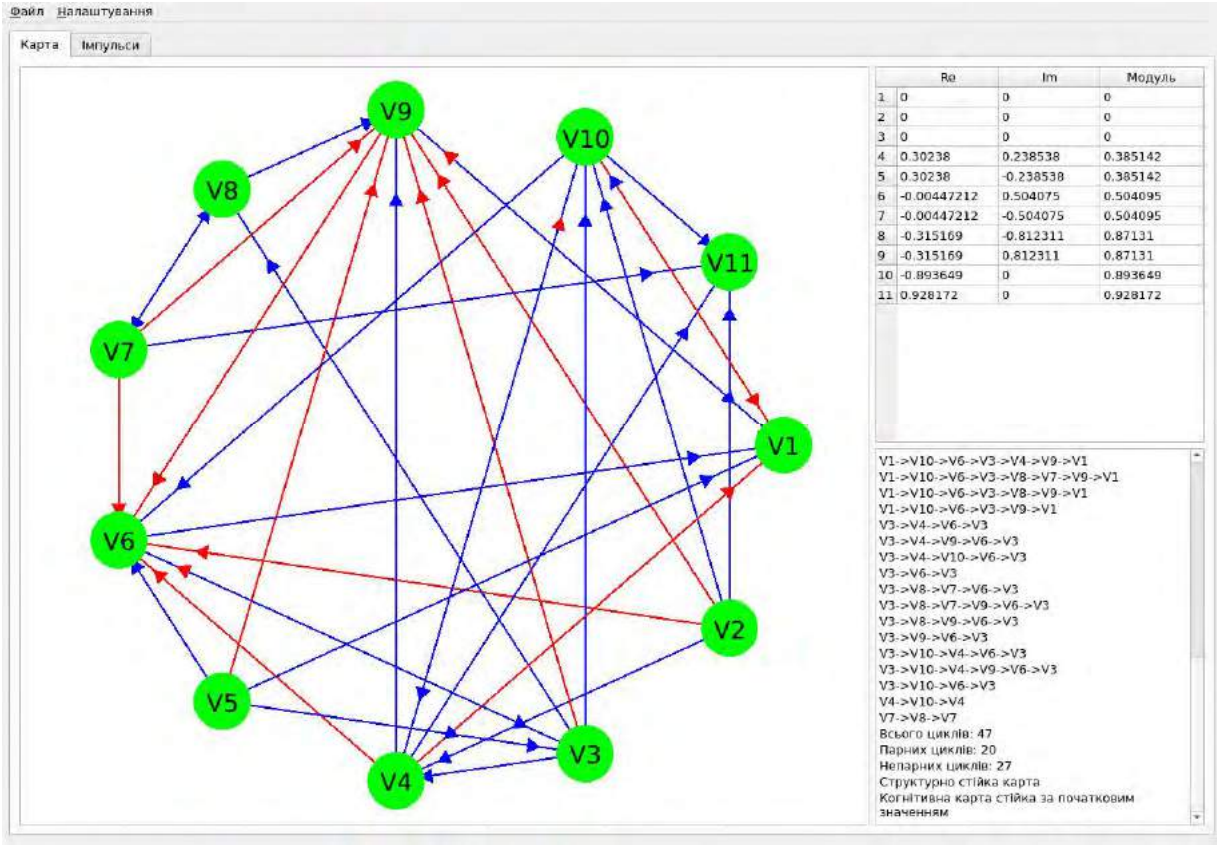


Рисунок 1.20 – Когнітивна карта з дослідженням її властивостей на чисельну та структурну стійкість

В даному випадку |M|=0,92<1, отже, модель Ф стійка до збурень.

Оскільки структурні властивості моделей Ф і G1 співпадають, переходимо до імпульсного моделювання. У процесі дослідження було проаналізовано 17 сценаріїв: сім – при внесенні одиничних впливів по черзі в усі 7 вершин, що збурюють процес (див. табл. 1.9), п'ять – при внесенні одиничних впливів в поєднання вершин по 2, два – при внесенні одиничних впливів в поєднання вершин по 3 і три сценарії при внесенні одиничних впливів в поєднання вершин по 4. У якості ілюстрації отриманих результатів наведемо дані імпульсного моделювання трьох сценаріїв (назвемо їх сценарії №3, №4, №5), що дозволяють в подальшому запропонувати основні висновки.

Сценарій №3.

Припустимо один з можливих «гірших» варіантів, коли рівень динамічного навантаження в системі починає «негативно» діяти на всю систему (q_1= –1), вектор збурень; $Q_4 = \{q_1 = -1;\ q_2 = 0;\ \ldots\ q_{10} = 0\}$.

Результати моделювання представлені на рис. 1.21.

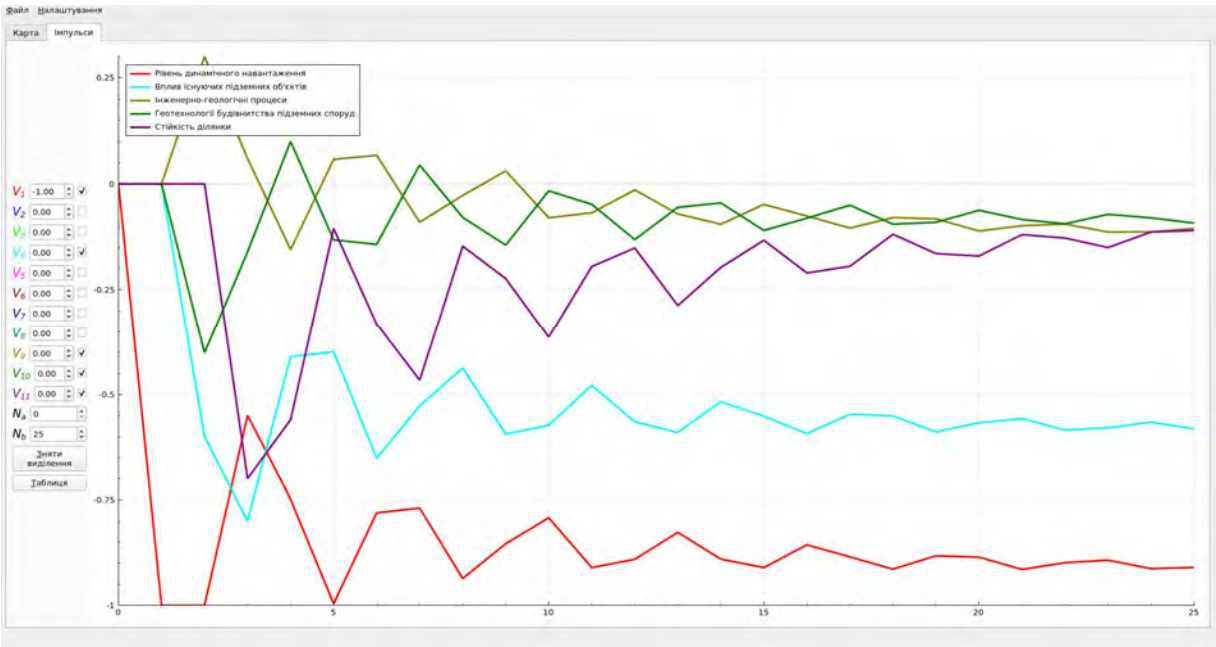


Рисунок 1.21 – Графіки імпульсних процесів за сценарієм 3

Як бачимо, по результатам моделювання сценарію №3, негативний вплив динамічного навантаження породжує в системі тенденції погіршення її

показників. Найбільш це помітно за негативним впливом існуючих підземних об’єктів та погіршенням стійкості ділянки.

Для сценаріїв №4 і №5 повторимо умови сценаріїв №1 та №2

Сценарій №4. Нехай геотехнології будівництва підземних споруд удосконалюються, імпульс $q_{10} = +1$ вводиться в вершину V_{10}, вектор збурень $Q_1 = \{q_1 = 0; q_2 = 0; \ldots q_{10} = +1\}$.

Результат розрахунків наведено на рисунку 1.22.

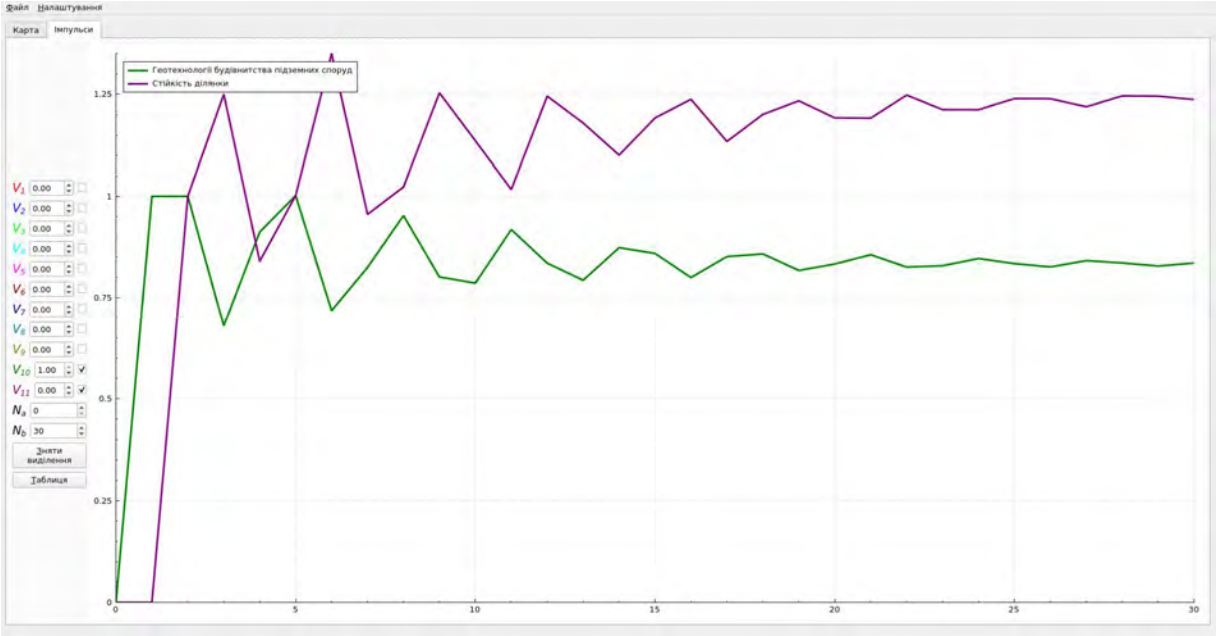


Рисунок 1.22 – Графіки імпульсних процесів за сценарієм 4

Сценарій №5. Нехай відбувається порушення чотирьох вершин: спостерігається негативний вплив на систему статичного навантаження від поверхневої забудови ($q_2 = -1$) і існуючих підземних об’єктів ($q_4 = -1$), але інженерно-геологічні процеси і геотехнології будівництва підземних споруд передбачаються позитивними ($q_9 = +1$ и $q_{10} = +1$); вектор збурень $Q_2 = \{0; \ldots ; q_2 = -1; \ldots; q_4 = -1; \ldots q_9 = +1; q_{10} = +1\}$.

Результати розрахунків наведені на рисунках 1.23 і 1.24.

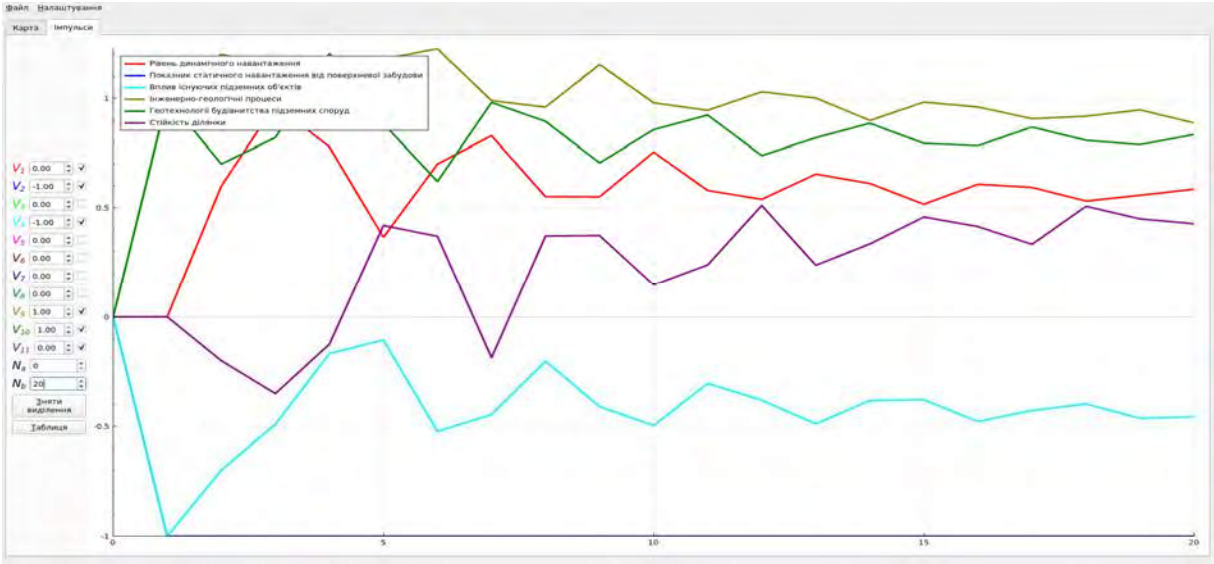


Рисунок 1.23 – Графіки імпульсних процесів за сценарієм 5

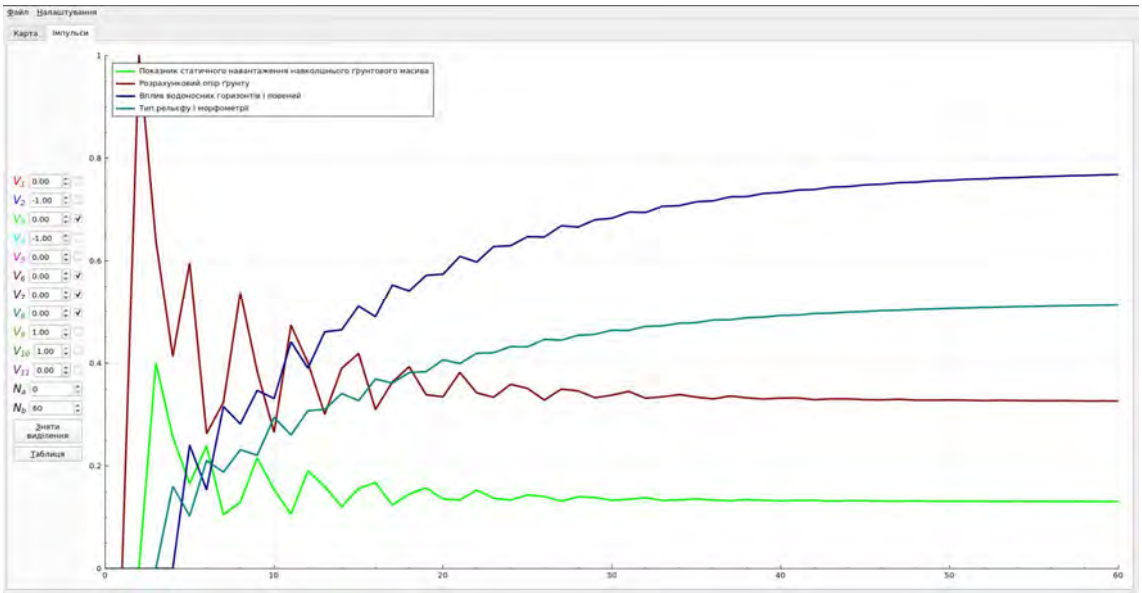


Рисунок 1.24 – Графіки імпульсних процесів за сценарієм 5

Аналіз результатів сценаріїв №4 та 5 показав можливість протистояти негативним впливам вершин V_2 (Показник статичного навантаження від поверхневої забудови) і V_4 (Вплив існуючих об’єктів) шляхом позитивних дій, що управляють на вершини V_9 (Інженерно-геологічні процеси) і V_{10} (Геотехнології будівництва підземних споруд).

Сценарний аналіз на моделі Ф показав, що при внесенні збурень в будь-які її вершини породжують імпульсні процеси, які через певний час стабілізуються на певному рівні; система виявляється імпульсно стійкою.

Таким чином, результати проведеного когнітивного моделювання дають можливість судити про те, що когнітивні моделі G і Ф систематизують і структурують різну інформацію про систему підземного будівництва тунелю, відповідають реальній системі і можуть бути використані для прогнозування можливих процесів розвитку ситуацій в системі при впливі на неї різних збурюючих і керуючих факторів.

Але при вирішенні проблем будівництва на конкретній ділянці необхідно в дослідну схему вводити і кількісні характеристики вершин; можливо також поява необхідності збільшення числа вершин і коригування структури когнітивної моделі, що залежить від подальшої інформації, отриманої при застосуванні морфологічного та фрактального аналізів.

2 СИСТЕМНІ СТРАТЕГІЇ ВИКОРИСТАННЯ ПІДЗЕМНОГО ПРОСТОРУ

2.1 Об’єкти мережевих моделей підземної інфраструктури

Проблема дослідження критичних ситуацій і факторів природного, техногенного та терористичного характеру, які можуть становити певну небезпеку для міської інфраструктури, а також пошуку і обґрунтування заходів і засобів по її виключенню або зниженню, характеризується наступними особливостями:

– великою кількістю факторів небезпечних ситуацій і необхідністю виявлення джерел і причин їх виникнення;

– необхідністю виявлення і вивчення повного спектру можливих заходів

і засобів протидії небезпечним факторам для забезпечення безпеки транспортних комунікацій та інженерних мереж.

Це потребує розробки сучасних ефективних, адекватних та надійних мережевих моделей безпеки міської інфраструктури.

Згідно з основною ідеєю проєкту, а саме – переведення в підземний простір найбільш вразливих або екологічно загрозливих ділянок інфраструктурних мереж, виділимо об’єкти (на прикладі м. Києва), які будуть покладені в основу мережевих моделей. Вагомий вплив на зменшення екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору м. Києва можуть здійснити – закладені в Генеральний план м. Києва 8 автомобільних тунелів, 3 з них – під Дніпром (рис. 1.2), запропоновані авторами тунельний дюкер під Дніпром для перепуску стічних вод з правобережного Києва до Бортницької станції аерації, тунельний перехід Дніпра кільцевою магістраллю в районі м. Українка, підземна автомагістраль під Набережно-Хрещатицькою вулицею від Поштової площі до Церкви Миколи Чудотворця (рис. 2.1–2.3).

Рисунок 2.1 – Локалізація трубних та тунельного дюкерів під Дніпром

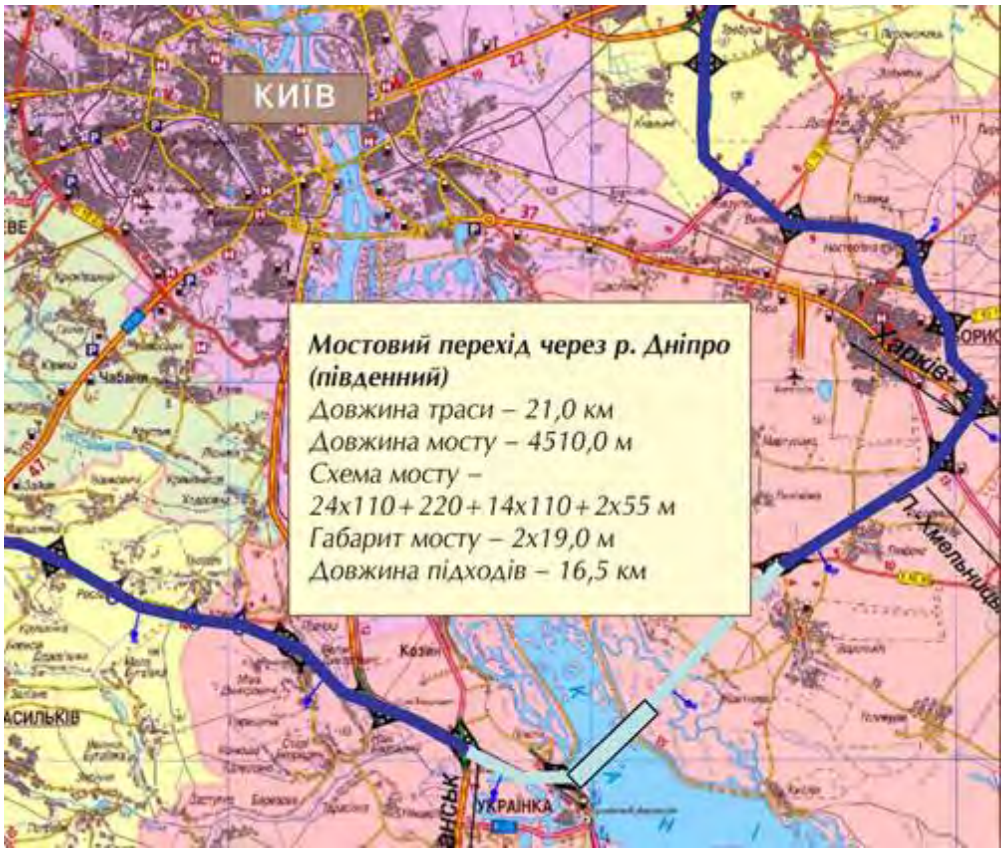


Рисунок 2.2 – Південний мостовий перехід через Дніпро кільцевою магістраллю, який може бути замінений тунельним переходом

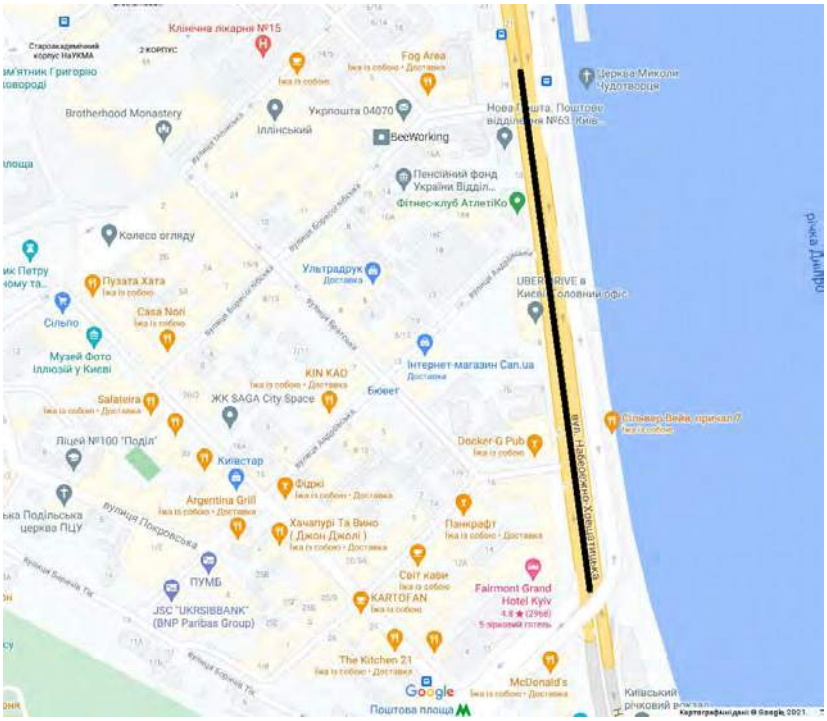


Рисунок 2.3 – Траса тунелю вздовж вул. Набережно-Хрещатицька

Одним із найбільш критичних елементів інфраструктури м. Києва залишаються трубні дюкери під Дніпром, які перепускають стічні води з Правобережного Києва на Лівобережний до Бортницької станції аерації (див. рис. 2.1). Система складається з прокладених по дну Дніпра 7 трубних дюкерів (сталевих труб) діаметром 1400 мм і довжиною 890 – 995 м, з них 4 збудовані 1965 р., 2 – 1975 р., 1 – 1989 р. (строк нормативної експлуатації – 30 років). За висновками комісії МЧС 2007 р. стан більшості дюкерів визнаний аварійним. Є загроза не тільки абразивного зношення, але й руйнації внаслідок вимоїн під трубами і замежевих напружень зношеного матеріалу. Зараз ведеться реконструкція частини трубних дюкерів, яка передбачає протягування в них поліетиленових рукавів для запобігання прориву каналізаційних стоків у Дніпро (рис. 1.5). На думку експертів, така реконструкція може бути лише тимчасовою мірою, яка забезпечить обмежений у часі захист в разі корозійного зношення труб. Оцінка природних і терористичних загроз для цих об’єктів не проводилася й складає одну із задач даного дослідження. Авторська пропозиція щодо заміни (або

переведення в резервний стан) труб тунельним дюкером (по лінії К1, див. рис. 2.4), що може бути споруджений щитовим способом на глибині 30–40 м під Дніпром, розглядається як альтернативна проєктна конфігурація, яка здатна повністю виключити можливість катастрофічного розвитку подій на 100 і більше років [68]. Актуальність цього проєкту зростає з урахуванням інвестицій уряду Японії в реконструкцію Бортницької станції аерації (близько $ 1 млрд.).

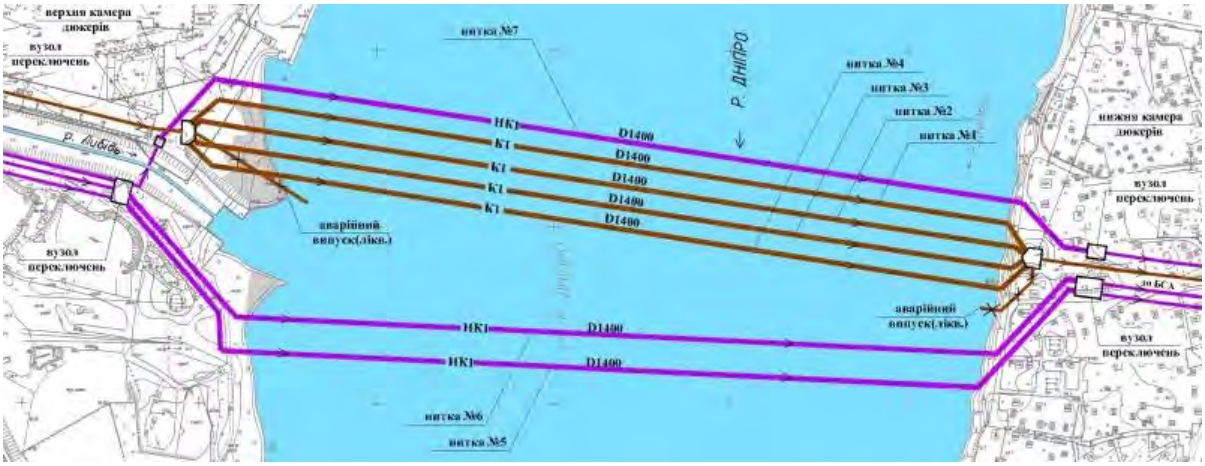


Рисунок 2.4 – Схема розташування трубних дюкерів під Дніпром (м. Київ)

Проектом будівництва першої черги кільцевої дороги навколо Києва передбачено спорудження південного мостового переходу через р. Дніпро (див. рис. 2.2), причому проектна довжина мосту складає 4510 м. Проте в експертному середовищі це рішення залишається дискусійним. Це пов’язано з екологічною проблемою, зумовленою потоком машин кільцевої магістралі в невеличкому місті, безпекою мешканців міста, а також необхідністю відчуження значних обсягів приватних земель для будівництва траси та транспортних розв’язок. Вирішити ці проблеми й значною мірою оптимізувати трасу південного переходу кільцевої магістралі можуть спарені автомобільні тунелі. Кільцева магістраль навколо Києва є пріоритетним об’єктом державної програми «Велике будівництво».

Створення нових природних і рекреаційних зон у великих містах пов’язано з наданням прибережних територій навколо водних об’єктів людям, припиненням транспортного руху вздовж набережних і облаштування їх як зон відпочинку та

екологічного комфорту (європейські проєкти ревіталізації річок у містах REURIS, River Restoration Center та ін.). У Києві подібний проєкт можливо здійснити завдяки переведенню ділянки автомобільної магістралі на вулиці Набережно-Хрещатицька від Поштової площі до Церкви Миколи Чудотворця в тунель. Це забезпечить вільний доступ великої кількості туристів і мешканців Києва до берегу Дніпра в одному з найбільш туристичних осередків столиці, значно покращить екологічну ситуацію та функціональність цієї дільниці, відкриє нові можливості для розвитку престижної рекреаційної зони. Проєкт може бути поєднаний з будівництвом підземного археологічного музею на Поштовій площі. Цей тунель також слід розглядати як важливий елемент аналізу транспортної інфраструктури м. Києва.

Таким чином, виділено 11 протяжних підземних об’єктів (тунелі, дюкери), здатні суттєво вплинути на екологічні та безпекові чинники урбаністичного простору столиці.

2.2 Аналіз прокладання транспортних тунелів м. Києва з використанням фрактального аналізу

При розвитку інфраструктури міст, для прийняття рішень щодо вибору найбільш доцільного варіанту розвитку що може бути пов’язаним з вибором типу об’єкту або його локації, треба врахувати багато факторів в умовах невизначеності та ризиків. У цьому випадку, треба розрахувати об’єктивну оцінку варіанту, яка повинна враховувати ризики, вартість, складність варіанту, необхідні ресурси, тощо. Одним з важливих компонентів оцінки варіанту реалізації – це складність як самого об’єкту так і району його розташування. Складність може мати як негативні, так й позитивні наслідки. Складність забудови має негативне значення для об’єктів на поверхні, але позитивне значення для об’єктів підземної інфраструктури, наприклад тунелів, які можуть “розвантажити” поверхню, тому у районах з високою складністю доцільно розвивати підземну інфраструктуру.

Особливо це стосується транспортної інфраструктури, де нове будівництво або реконструкція через високу складність району, можуть зіткнутися з багатьма проблемами. Тому адаптовані методи фрактального аналізу можуть використовуватись для підтримки прийняття рішень.

Взагалі фрактальний аналіз можна застосовувати до різних фізичних об'єктів або процесів з фрактальними характеристиками. Фрактал – це множина чия розмірність Хаусдорфа перевищує топологічну розмірність [69]. У цілому, фракталоподібні об'єкти часто можна зустріти в природі, включаючи берегові лінії, геологічні переломи, гори, дерева, кровоносні капіляри, легені, межі, шляхи руху частинок. Також, багато процесів мають фрактальні властивості, наприклад, спектри сигналів нелінійних складних систем або спектри сигналів ядерного магнітного резонансу.

Фрактальний аналіз обчислює складність об'єкта або набору даних. Основною метрикою складності є фрактальна розмірність. Набір даних може бути будь-яким, включаючи сигнали, зображення, процеси, природні явища, поведінкові моделі, живі організми, культурні роботи, геологічні дані тощо. Якщо це фізичний об'єкт, набір даних може включати такі виміри, як його форма, його рух, його розвиток, його сигнали або поведінка. Існує багато різних визначень розмірності фрактальних множин. Розмістивши дані в n-мірній решітці з розміром сітки r, ми можемо розрахувати частоту p_i, з якою точки даних розміщуються в і-й комірці, та обчислити узагальнену фрактальну розмірність $D_q = \frac{1}{q-1}\lim_{r\to 0}\frac{\log\sum_i p_i^q}{\log r}$.

Часто використовуються такі розмірності: фрактальна розмірність Хаусдорфа ($q = 0$), інформаційна розмірність ($\lim_{q\to 1} D_q$), кореляційна розмірність ($q = 2$). Інформаційна та кореляційний розмірності часто використовуються в інтелектуальному аналізі даних [70, 71].

Методи фрактального аналізу часто використовуються у багатьох сферах для розв’язання різноманітних проблем у галузі охорони здоров’я, екології,

астрономії, досліджень міст, хімії, інформатики, літератури, музики, мистецтва тощо [72–77]. Фрактальний аналіз в основному спрямований на вимірювання складності об’єкта, яка пов’язана з властивостями певного об’єкта чи властивостями іншого об’єкта чи системи, що впливає на нього. Наприклад, вимірюючи складність спектру інтервалів серцебиття, ми можемо зробити висновок про стан регуляторної системи організму або, вимірявши складність капілярної мережі, ми можемо зробити висновок про руйнівні ефекти діабету. Фрактальний аналіз також може відстежувати зміни складності з часом і робити висновки про те, як основні процеси впливають на це. Наприклад, відбуваються зміни в складності геологічних розломів внаслідок ерозії або в складності міських територій внаслідок розвитку міста. Крім того, фрактальний аналіз може запропонувати використовувати складність як ефективну метрику для об'єкта для цілей класифікації.

Сьогодні багато уваги приділяється використанню фрактального аналізу в аналізі міст. Наприклад, вивчалися фрактальна розмірність урбанізованих районів багатьох міст США та їх зростання, включаючи Нью-Йорк, Омаха, Балтімор та ін. [75]. Був досліджений Мілан [76], включаючи периметр міста та цілі урбанізовані райони. Інший прикладом є фрактальне дослідження Пекіну та Ханчжоу, де фрактальна розмірність характеризувала просторову складність міст [77]. Таким чином, фрактальний аналіз доцільно використовувати для оцінки міст та планування розвитку їх інфраструктури.

Для знаходження фрактальної розмірності (метрика складності) використовувався клітинковий метод (box counting). Припустимо $N(\eta)$ – кількість об’єктів з лінійним розміром, більшим ніж η, необхідним для покриття заданої множини (або об’єкта). Таким чином $N(\eta) \sim \eta^{-D}$, або, як варіант, $\log(N(\eta)) = a - D*\log(\eta)$, де a – деяка константа. Для обчислення D, об'єкт покриваємо сіткою квадратів (або, у n-мірному випадку, n-мірними гіперкубами), починаючи з розміру η_1, знаходячи число $N(\eta_1)$ квадратів (гіперкубів), що містять частину

об'єкта. Потім це повторюють з використанням розміру η_2, отримуючи $N(\eta_2)$ квадратів (гіперкубів). Цей крок повторюється S разів, використовуючи поступово менші розміри. Нарешті, будується лінія регресії між незалежною змінною $\log(\eta_i)$ та залежною змінною $\log(N(\eta_i))$, де $i=1,...,S$. Фрактальна розмірність D визначається як абсолютне значення її нахилу.

Ми розглянули вісім варіантів розташування підземних тунелів міста Києва які включають в себе два транспортні тунелі під р. Дніпро (рис. 1.2) та підрахували складність цих районів з точки зору забудови використовуючи фрактальну розмірність як метрику складності. Був розроблений цілий інструментарій для допомоги у підтримці прийняття рішень. Він включає в себе отримання мап високої роздільної здатності, екстракцію районів що відповідають досліджуваним об’єктам, автоматичну обробку мап та виділення з них забудови та надземною інфраструктури, обчислення метрики складності для підтримки прийняття рішень.

Були досліджені наступні об’єкти (рис. 2.5–2.10):

1. Тунель №1 під ботанічним садом – вихід до Дарницького мосту довжиною 1.5 км;
2. Тунель №2 від вул. Кирилівська до вул. Чорновола довжиною 1.2 км;
3. Тунель №3 – північний тунельний перехід через р. Дніпро довжиною 4.3 км;
4. Тунель №4 – південний тунельний перехід через р. Дніпро довжиною 4.4 км;
5. Тунель №5 від площі Перемоги до Дніпра і далі під Дніпром довжиною 7 км;
6. Тунель №6 від вул. Набережно-Лугова до вул. Богатирської довжиною 1.8 км;
7. Тунель №7 від вул. Кирилівська до вул. Володимира Брожка довжиною 11.1 км;
8. Тунель №8 на подовженні вулиць Саксаганського та Жилянська до Набережного шосе довжиною 3.0 км.

(а) (б)

Рисунок 2.5 – Тунель №2 від вул. Кирилівська до вул. Чорновола довжиною 1.2 км ((а) – мапа де розташований тунель, (б) – мапа після обробки)

(а) (б)

Рисунок 2.6 – Тунель №3 північний тунельний перехід через р. Дніпро довжиною 4.3 км ((а) – мапа де розташований тунель, (б) – мапа після обробки)

(а)

(б)

Рисунок 2.7 – Тунель №4 південний тунельний перехід через р. Дніпро довжиною 4.4 км ((а) – мапа де розташований тунель, (б) – мапа після обробки)

(а)

(б)

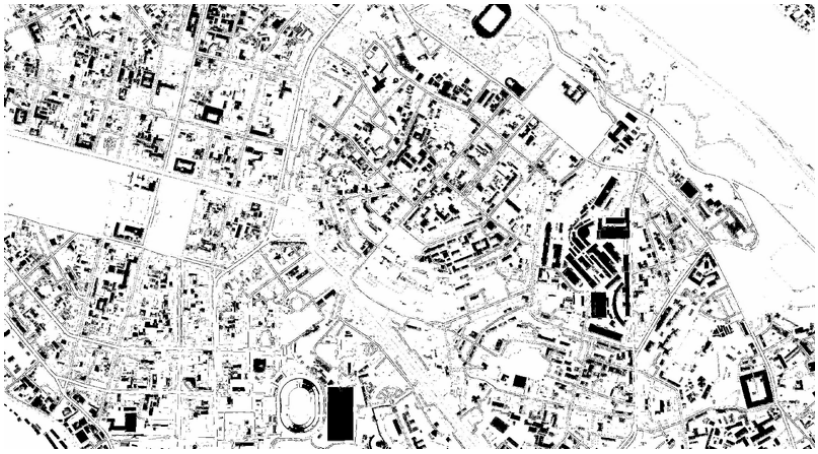
Рисунок 2.8 – Тунель №6 від вул. Набережно-Лугова до вул. Богатирської довжиною 1.8 км ((а) – мапа де розташований тунель, (б) – мапа після обробки)

(а)

(б)

Рисунок 2.9 – Тунель №7 від вул. Кирилівської до вул. Володимира Брожка довжиною 11.1 км ((а) – мапа де розташований тунель, (б) – мапа після обробки)

(а)



(б)

Рисунок 2.10 – Тунель №8 на подовженні вулиць Саксаганського та Жилянська до Набережного шосе довжиною 3.0 км ((а) – мапа де розташований тунель, (б) – мапа після обробки)

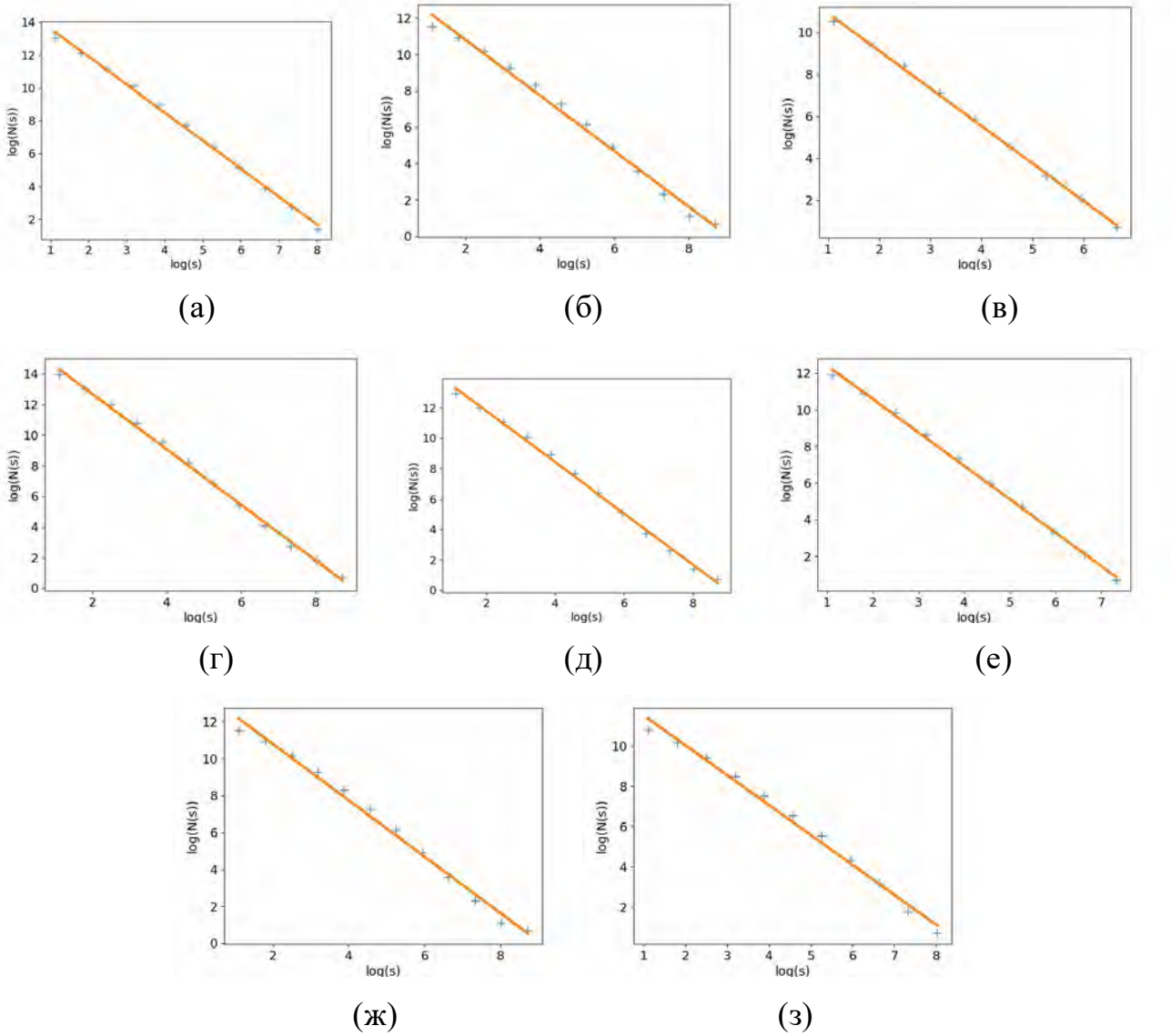


Рисунок 2.11 – Графік log (N(s)) проти log (s) за клітинковим методом (box counting) для районів де пропонується будівництво тунелів з лінією регресії ((а) район тунелю №1, (б) район тунелю №2, (в) район тунелю №3, (г) район тунелю №4, (д) район тунелю №5, (е) район тунелю №6, (ж) район тунелю №7, (з) район тунелю №8)

Для оцінки складності районів, де розглядається будівництво тунелів, був використаний наступних підхід: були використані Google Maps високої роздільності (рівень 17, який містить забудову), виділені відповідні райони та

зроблена обробка зображень для виділення об’єктів для яких розраховується складність. Рис. 2.5–2.10 містять мапи районів проходження деяких тунелів до та після обробки зображень. Методом фрактального аналізу була розрахована їх складність. Був застосований клітинковий метод (box counting) для розмірів сітки починаючи з 400 до 3 пікселів та після побудови лінії регресії для кожного кейса, були отримані наступні результати для складності (табл. 2.1):

Таблиця 2.1 – Складність надземної забудови та інфраструктури в районах тунелів

Об’єкт	Складність
Район над тунелем №1	1.70
Район над тунелем №2	1.79
Район над тунелем №3	1.48
Район над тунелем №4	1.53
Район над усім тунелем №5	1.68
Район під тунелем №5 на правому березі Дніпра	1.73
Регіон під тунелем №5 на лівому березі Дніпра	1.60
Район над тунелем №6	1.69
Район над тунелем №7	1.81
Район над тунелем №8	1.82

На рис. 2.11, для кожного об’єкту, представлені графіки log(N(s)) проти log(s) з лінією регресії яки використовувалися для обчислення фрактальної розмірності, де s – це розмір клітинок та N(s) – це кількість клітинок розміру s необхідної для покриття всього об’єкту.

Найбільша складність забудови та транспортної інфраструктури є над об’єктами №2 (D = 1.79), №7 (D = 1.81) та №8 (D = 1.82). З іншого боку, найменша складність є над об’єктом №3 (D = 1.48).

Є декілька висновків які ми можемо зробити. По-перше, якщо стає задача прийняття рішення щодо вибору технології реалізації об’єкта, то висока складність надземної забудови та інфраструктури спонукає приймати рішення щодо вибору підземної магістралі. З іншої сторони, коли складність надземної забудови та інфраструктури невелика, вже немає сильної потреби обирати дорогу підземну реалізацію магістралі: у цьому випадку можна обрати більш дешеву альтернативу, наприклад побудова естакади або хайвею.

По-друге, якщо стає задача обрати підземні тунелі для реалізації транспортних магістралей (іншими словами, для пріоритезації проектів), то одним з факторів який впливає на вибір об’єкту може теж бути складність надземної забудови та інфраструктури. Чим більш велика ця складність, тим більш важливим є вибір цього об’єкту, тому що насамперед треба вирішувати транспортні проблеми саме в місцях де є велика складність забудови та інфраструктури. Таким чином, на розглянутих прикладах, ми вважаємо що з точки зору обчисленої нами складності, об’єкти №8, №7 та №2 мають високий пріоритет для реалізації в порівнянні з іншими об’єктами. Щодо вибору технології, то з точки зору обчисленої складності, для об’єктів №2, №6, №7 та №8, саме підземні тунелі є найбільш доцільними, а для об’єктів №3 та №4 можна розглядати надземні альтернативи.

Розроблена методологія та інструментарій щодо оцінювання складності об’єктів забудови та інфраструктури може використовуватись у процесі прийняття рішень. Але складність є лише одним з факторів які використовуються для прийняття рішень. Є дуже багато інших факторів включаючи ціну, інші пріоритети, важливість об’єкту або регіону, складнощі самою транспортної ситуації та багато інших факторів. Але складність об’єктів забудови та інфраструктури є додатковим важливим фактором у процесі прийняття рішень.

Наступним кроком у роботі є розробка та використання метрики складності підземної інфраструктури у місті прокладання тунелю. Якщо висока складність

надземних об’єктів спонукає на прийняття рішення щодо доцільності тунелів, то висока складність підземних об’єктів може викликати додаткові проблеми побудови тунелів у цьому місті включаючи необхідність розташовувати тунелі на більшій глибині, що сприяє підвищенню витрат на будування. Таким чином вже виникає пошук компромісу між конкуруючими складностями надземної та підземної інфраструктури.

Для дослідження цього питання були проведені дослідження підземної інфраструктури для розглянутих об’єктів. Були використані дані каналізаційної мережі м. Києва представленою на рис. 2.12.

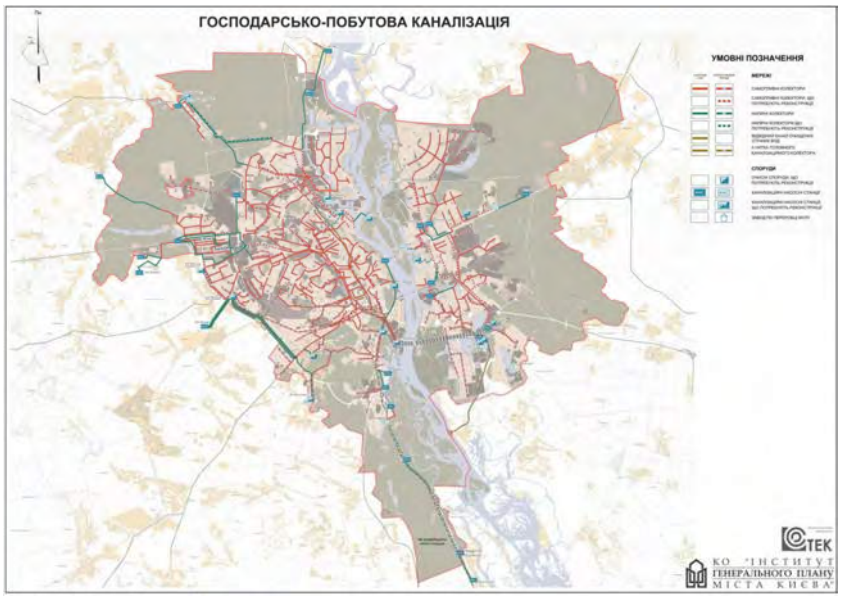


Рисунок 2.12 – Мапа зі схемої каналізаційних мереж м. Києва

Для оцінки складності підземної інфраструктури, де розглядається будівництво тунелів, був використаний тільки один показник – складність підземної каналізаційної мережі. Для розрахунку складності мережі, растрове зображення мапи зі схемою мереж було оброблене та з нього виділена сама схема (рис. 2.13). Після цього, для кожного розглянутого об’єкта відповідна частина мережі була виділена.

Рисунок 2.13 – Виділена схема каналізаційних мереж м. Києва

Для кожного району проходження деяких тунелів, методом фрактального аналізу була розрахована складність каналізаційних мереж. Був застосований клітинковий метод (box counting) для розмірів сітки починаючи з 400 до 3 пікселів та після побудови лінії регресії для кожного кейса, були отримані наступні результати для складності (табл. 2.2):

Таблиця 2.2 – Складність підземної інфраструктури в районах тунелів

Об’єкт	Складність
Район тунелю №1	1.32
Район тунелю №2	1.38
Район тунелю №5	1.42
Район тунелю №6	1.14
Район тунелю №7	1.55
Район тунелю №8	1.52

Для тунелів №3 та №4 інформація про підземні мережі була відсутня.

Для кожного з цих об’єктів, були побудовані графіки log(N(s)) проти log(s) з лінією регресії для обчислення фрактальної розмірності, де s – це розмір клітинок та N(s) – це кількість клітинок розміру s необхідної для покриття всього об’єкту.

Найбільша складність підземної інфраструктури є для об’єктів №7 (D = 1.55) та №8 (D = 1.52). З іншого боку, найменша складність є для об’єкту №6 (D = 1.14).

З цього можна зробити такі висновки, що для об’єктів де підземна інфраструктура має високу складність, підземна реалізація може бути складною та коштувати більше, яка може наприклад вимагати більшу глибину прокладання тунелів. З іншого боку, для об’єктів де підземна інфраструктура має невелику складність (наприклад, №6), підземна реалізація може мати менше проблем.

Але оцінка тільки складності каналізаційних мереж є лише одним з факторів які впливать на прийняття рішень. Інши фактори можуть включати в себе водопроводні, газові та електричні мережі, стан грунтів, наявність інших тунелів та багато інших чинників. Тому у майбутньому треба не тільки оцінити кожен з цих факторів, а створити модель для об’єднання усіх факторів у один показник.

2.3 Морфологічне моделювання небажаних подій та їх наслідків для урбаністичних об’єктів

Метою побудови даної морфологічної моделі є опис небажаних подій, які потенційно можуть вплинути на деякий підземний урбаністичний об’єкт або клас об’єктів. Такі небажані події можуть включати як природні стихійні лиха та катастрофи, так і події техногенного або антропогенного походження (зокрема – зі зим умислом: військові дії, терористичні акти). Результатом цього моделювання є аналіз наслідків події для об’єкта дослідження, можливість порівняти різні об’єкти або їх проєкти з точки зору стійкості та здатності протистояти різнорідним небажаним подіям.

Для моделювання залучено двоетапний модифікований метод морфологічного аналізу [9, 20], в якому на першому етапі описується множина потенційних небажаних подій, а на другому етапі аналізуються наслідки цих подій у різних аспектах для об’єкта дослідження. Особливістю цього дослідження є те, що для різних об’єктів і класів об’єктів принципово відрізняються зв’язки між параметрами небажаних подій і їх наслідками, тому розгляд кожного окремого об’єкта вимагає не тільки заповнення вхідних оцінок альтернатив, як це було в попередніх дослідженнях [41, 42, 78], а і заповнення матриць взаємозв’язків і зв’язків.

Для виділення основних характеристичних параметрів небажаних подій була опрацьована законодавча база щодо загроз безпеці людини та урбаністичного середовища, зокрема Закони України, Укази Президента України та Постанови Кабінету Міністрів: «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру», «Про Цивільну оборону України», «Про боротьбу з тероризмом», «Про об’єкти підвищеної небезпеки», «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення», «Про Концепцію захисту населення і територій у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій», «Про заходи щодо підвищення рівня захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру», «Про інженерний захист територій, об’єктів і споруд від зсувів», «Про затвердження Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру», а також нормативна документація: ДБН В.1.1-3-97 «Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів», ДБН В.2.2.5-97 «Захисні споруди цивільної оборони», ДБН В.1.1-5-2000 «Будинки і споруди на підтоплюваних територіях та просідаючих ґрунтах», ДБН В.1.2-4-2006 «Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони)», ДБН Б.1.1-6:2007 «Склад, зміст, порядок розроблення, погодження та затвердження схем планування території району» та ін.

Аналіз дозволив виділити три основних характеристичних параметри небажаних подій, релевантних для цього дослідження.

Параметр 1: Тип небажаної події. Розглядається саме першопричина, або тригер небажаної події. Зрозуміло, що такі події можуть викликати певну ланцюгову реакцію: наприклад, вибух спричинює пожежу, пожежа спричинює руйнування і т.д., однак в рамках даного дослідження подальші руйнівні процеси відносяться вже до наслідків, оскільки розглянути всі можливі варіанти перебігу небажаних подій неможливо й недоцільно.

Виділено шість основних альтернатив типів небажаних подій:

- вибух;
- пожежа;
- зсуви, провали та просідання ґрунту;
- погодні катаклізми;
- експлуатаційні пошкодження та/або руйнування конструкцій об’єкту;
- порушення функціонування без конструктивних пошкоджень.

Варто зазначити, що в цьому дослідженні будується універсальна модель, тому для деяких об’єктів певні типи небажаних подій є в принципі неможливими (наприклад, пожежа для водостічного трубного дюкеру, що прокладений по дну річки). В таких випадках при оцінюванні дана альтернатива отримує оцінку ймовірності «0» і, відповідно, не бере участь у подальшій процедурі модифікованого методу морфологічного аналізу.

Параметр 2: Походження небажаної події. Виділено 4 альтернативних походження для небажаних подій:

- антропогенне зі злим умислом (тероризм, диверсії, бойові дії);
- антропогенне без злого умислу (помилки, недбалість, недотримання норм будівництва або експлуатації);
- технічне, технологічне (технічні відмови, поламки, руйнування за рахунок технологічних факторів, корозії тощо);

- природне (атмосферні, гідросферні й літосферні збурення, стихійні лиха).

Параметр 3: Масштаб впливу небажаної події. Розглядаються 5 альтернатив:

- окремий структурний або функціональний елемент об’єкта, або окрема ділянка;
- декілька структурних або функціональних елементів об’єкта, або декілька ділянок;
- об’єкт повністю;
- об’єкт і сусідні до нього;
- район міста і більше.

Розгляд катастроф більших масштабів виходить за межі цього дослідження, оскільки розглядаються наслідки небажаної події в рамках певного об’єкта. Тому катастрофи великих масштабів об’єднані в альтернативу «район міста і більше».

Побудуємо морфологічну таблицю на основі запропонованих параметрів (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Опис небажаних подій

Параметр	Альтернатива
1. Тип небажаної події	1.1 Вибух
	1.2 Пожежа
	1.3 Зсуви, провали та просідання ґрунту
	1.4 Погодні катаклізми
	1.5 Експлуатаційні пошкодження та/або руйнування конструкцій об’єкту
	1.6 Порушення функціонування без конструктивних пошкоджень
2. Походження небажаної події	2.1 Антропогенне зі злим умислом
	2.2 Антропогенне без злого умислу
	2.3 Технічне, технологічне
	2.4 Природне
3. Масштаб впливу небажаної події	3.1 Окремий структурний або функціональний елемент об’єкта, або окрема обмежена ділянка
	3.2 Декілька структурних або функціональних елементів об’єкта, або декілька ділянок
	3.3 Об’єкт повністю
	3.4 Об’єкт і сусідні до нього
	3.5 Район міста і більше

Очевидно, що параметри таблиці сильно залежать один від одного, тому при побудові моделі необхідно оцінювати і враховувати матрицю взаємозв'язків цих параметрів, причому для різних типів об'єктів параметри небажаних подій можуть бути пов'язані неоднаково, що вимагає окремого оцінювання матриці взаємозв'язків для кожного наступного типу об'єкта, що розглядається.

Морфологічна таблиця другого етапу дослідження містить параметри наслідків небажаних подій, і їх альтернативи. Оскільки наслідки можуть бути досить різноплановими, для всебічного їх розгляду виділено 8 параметрів.

Параметр А. Цілісність об'єкта/його елементів. Параметр описує, наскільки сильні пошкодження отримав об'єкт в результаті впливу небажаної події. Можна виділити чотири принципово відмінні альтернативи:

- пошкоджень немає або вони мінімальні;
- пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності;
- пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності;
- пошкодження невідновні.

Параметр Б. Здатність до функціонування. Параметр описує, в якій мірі об'єкт може виконувати свої функції при впливі небажаної події. Задано три альтернативи:

- об'єкт може виконувати всі функції;
- об'єкт може виконувати частину функцій;
- об'єкт припиняє функціонування.

Параметр В. Можливість передачі функцій іншим об'єктам. Параметр показує, чи можуть функції об'єкта в разі необхідності (тобто неможливості виконувати свої функції як наслідку небажаної події) бути передані іншим урбаністичним об'єктам. Задано чотири альтернативи:

- функції об'єкта можуть бути передані без обмежень;

- функції об’єкта можуть бути передані з певними обмеженнями;
- функції об’єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями;
- функції об’єкта не можуть бути передані.

Параметр Г. Час відновлення функціонування. Параметр описує, скільки часу знадобиться для відновлення об’єкта після впливу небажаної події. Задано п’ять альтернатив:

- час на відновлення функціонування непотрібний;
- відновлення функціонування може бути здійснене за час до 7 діб;
- відновлення функціонування може бути здійснене за час до 1 місяця;
- відновлення функціонування може бути здійснене за час до 0,5 року;
- об’єкт не може бути відновлений протягом 1 року.

Параметр Д. Кількість постраждалих. Параметр вказує приблизну кількість осіб, які можуть постраждати в разі настання небажаної події на об’єкті. Задано п’ять альтернатив у відповідності з нормативними документами:

- постраждалих немає;
- до 10 осіб;
- 10–50 осіб;
- 50–200 осіб;
- більше 200 осіб.

Параметр Е. Порушені умови життєдіяльності. Параметр вказує приблизну кількість осіб, умови життєдіяльності яких можуть бути порушені в разі настання небажаної події на об’єкті. Задано п’ять альтернатив у відповідності з нормативними документами:

- таких осіб немає;
- до 10 осіб;
- 10–100 осіб;
- 100–1000 осіб;

- більше 1000 осіб.

Параметр Ж. Розмір матеріальних збитків. Параметр описує очікуваний розмір збитків в разі настання небажаної події на об’єкті. Збитки оцінюються відносно кількості мінімальних розмірів заробітної плати (МЗП). Задано чотири альтернативи у відповідності з нормативними документами:

- до 100 МЗП;
- 100–1000 МЗП;
- 1000–10000 МЗП;
- більше 10000 МЗП.

Параметр З. Екологічні наслідки. Параметр описує потенційні ризики для екологічної ситуації, якщо станеться небажана подія на об’єкті. Задано чотири альтернативи:

- немає помітних екологічних наслідків;
- незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації;
- значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території;
- екологічна катастрофа.

Параметри наслідків небажаних подій можна звести в морфологічну таблицю (табл. 2.4).

Таким чином, для заданого типу об’єктів на основі розрахунків МММА дана модель може виявити потенційні наслідки. Такий аналіз для задач досілдження наведений в розділі 3.

Таблиця 2.4 – Опис наслідків небажаних подій

Параметр	Альтернатива
А) Цілісність об’єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності
	А.4 Пошкодження невідновні
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об’єкт може виконувати всі функції
	Б.2 Об’єкт може виконувати частину функцій
	Б.3 Об’єкт припиняє функціонування
В) Можливість передачі функцій іншим об’єктам	В.1 Функції об’єкта можуть бути передані без обмежень
	В.2 Функції об’єкта можуть бути передані з певними обмеженнями
	В.3 Функції об’єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями
	В.4 Функції об’єкта не можуть бути передані
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний
	Г.2 До 7 діб
	Г.3 До 1 місяця
	Г.4 До 0,5 року
	Г.5 Об’єкт не може бути відновлений протягом 1 року
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає
	Д.2 До 10 осіб
	Д.3 10–50 осіб
	Д.4 50–200 осіб
	Д.5 Більше 200 осіб
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає
	Е.2 До 10 осіб
	Е.3 10–100 осіб
	Е.4 100–1000 осіб
	Е.5 Більше 1000 осіб
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП
	Ж.2 100–1000 МЗП
	Ж.3 1000–10000 МЗП
	Ж.4 більше 10000 МЗП
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території;
	З.4 Екологічна катастрофа

2.4 Аналіз структур когнітивних моделей складних систем при динамічних навантаженнях щодо планування раціональних конфігурацій підземного простору

Когнітивне моделювання складних систем є імітаційним моделюванням структури і поведінки складної системи на основі кількісних і якісних даних про неї; проводиться поетапно [79–81]. Основні етапи:

1. розробка когнітивної моделі в тій чи іншій математичній формі (від когнітивної карти до векторного параметричного функціонального графа);

2. дослідження властивостей моделі, на підставі яких робиться висновок про несуперечливість властивостей моделі властивостям досліджуваної складної системи;
3. сценарний аналіз, проведений шляхом імпульсного моделювання на когнітивній моделі, що дозволяє визначити можливий розвиток ситуацій в системі під впливом на неї зовнішніх, внутрішніх збурень і керуючих рішень.

Метою таких когнітивних досліджень є розуміння, пояснення, формальне подання складної системи (на основі структуризації наявних теоретичних, практичних знань, статистичних та експертних даних) і породження нових знань про систему, що необхідно для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Розроблена методологія [18, 65, 79–81] і програмне забезпечення когнітивного моделювання є інструментом дослідження властивостей складної системи (стійкості, зв'язності, складності та ін.) та її поведінки. У сукупності з методологією передбачення [18], яка застосовується на першому і третьому етапах когнітивного моделювання, результати дослідження служать для розробки рекомендацій щодо вдосконалення складної системи, для пропозиції бажаних стратегій розвитку системи і запобігання небажаних. Це можна вважати завершальним етапом дослідження.

Аналіз структур когнітивних моделей є одним з найважливіших етапів дослідження соціально-економічних, екологічних, політичних і т.п. систем, що відносяться до класу складних. Це викликано тим, що з ускладненням структури самих систем зростають вимоги до результатів аналізу, що впливає на організацію взаємодії підсистем системи, на підвищення якості управлінських рішень. Вивчення структури важливо для виявлення закономірностей існування і розвитку систем, виявлення таких особливостей і недоліків досліджуваних структур, які вимагають підвищеної уваги не лише дослідника, а й особи, що приймає рішення в реальній складній системі. Структурний аналіз також необхідний для вирішення

задачі структурного синтезу, яка виникає при розробці практично будь-яких систем на всіх етапах, починаючи з етапу передпроєктних досліджень, ескізного проєктування і закінчуючи випуском конструкторської документації. На етапі структурного аналізу формується початкове уявлення дослідника (експерта, особи, що приймає рішення) про досліджувану систему, яка впливає на визначення і пояснення багатьох характеристик систем. Найважливішими серед них є складність організації системи, значимість і зв'язність її елементів, слабкі місця системи, структурна стійкість.

Успішне вирішення завдань синтезу та аналізу структур складних систем неможливо без їх формалізації. В даний час існує безліч підходів і напрямків формалізації і математичних досліджень структурних властивостей складних систем. На етапі передпроєктних досліджень, коли розробляється математична модель складної системи, як апарату формалізації об'єктів, широко застосовується теорія графів. Добре розвинена теорія і практика застосування графів дає можливість представити структуру складного об'єкта як єдиного цілого, виявляти і досліджувати різні характеристики системи, вирішувати задачі синтезу систем з наперед заданими властивостями. Важливою особливістю використання теорії графів є те, що вона не накладає жорстких вимог до вихідної інформації при дослідженні системи, дозволяючи працювати як з кількісними, так і якісними даними. Ця особливість виявилася корисною в розвитку сучасного когнітивного імітаційного моделювання складних систем [18, 57, 65, 79–81], в якому модель складної системи є графом. Подання структури складної системи у вигляді графової когнітивної моделі того чи іншого виду, наприклад, у вигляді когнітивної карти (знаковий орієнтований граф, простіша математично модель системи) [57–59, 79, 80, 82], у вигляді зваженого орграфа, параметричного функціонального графа, нечіткого графа, ієрархічних когнітивних карт та ін. дає можливість проводити дослідження різних аспектів структурних властивостей системи,

успішно використовуючи апарат теорії графів і розроблені алгоритми розв’язання різних завдань структурного аналізу і синтезу.

Розробка когнітивної моделі складної системи проводиться на підставі різної теоретичної і практичної інформації, експертних та статистичних даних. На початкових етапах розробки когнітивної моделі прийнято використовувати методи SWOT- і PERT-аналізу [83, 84], методологію передбачення [18, 80], методи багатовимірного статистичного аналізу при наявності статистичних даних, в тому числі – наприклад, кластерного [85]. Кластерний аналіз, розроблений в теорії непараметричної статистики, дозволяє вивчати взаємодію компонентів системи, і їх класифікації. Кластерний аналіз являє собою сукупність методів класифікації багатовимірних спостережень (об'єктів числової і нечислової природи), заснованих на визначенні відстані між об'єктами з наступним виявленням з них кластерів (груп спостережень) з певними властивостями. «Вузьким місцем» кластерного аналізу є те, що у великій мірі вдалість класифікації залежить від досвіду дослідника. Але в будь-якому випадку, при моделюванні складної системи, в тому числі когнітивного, існує «ризик людського фактора» [86], для зниження якого пропонується проводити різнобічний аналіз, в тому числі, структурний.

Слід зауважити, що окремі підходи до дослідження структури складної системи дають можливість поглянути на систему з якої-небудь однієї сторони. Тому виникає проблема дослідження структури системи як на глобальному рівні, з позицій структури, як єдиного цілого, так і на локальних рівнях з позицій окремих підсистем і елементів. Для цих цілей є корисним застосовувати не тільки апарат теорії графів, а й алгебраїчної топології, теорії груп, теорії множин та бінарних відносин, що дозволяє проводити аналіз структури як складного багатовимірного геометричного утворення – симпліціального комплексу [58, 59]. Це можливо при мінімальній апріорній інформації щодо досліджуваних об'єктів і явищ.

Аналіз структурних властивостей моделі важливий також з позицій передбачення можливої поведінки складної системи в різних умовах змін внутрішнього і зовнішнього середовища системи. Зауважимо, що складність структури – не єдина ознака складної системи, навіть зовні «проста» структура може мати різні неочевидні властивості, в тому числі вирізнятися складною поведінкою (динамікою) [56]. Тому аналіз структури системи спільно з породжуваними на ній динамічними процесами є важливим.

2.5 Структурні властивості когнітивної карти складної системи на основі симпліціального аналізу

Беручи до уваги факт, що структура складної системи, утворена її підсистемами, елементами і відносинами між ними, визначає її властивості, поведінку (розвиток, динаміку), розглянемо, яким чином це можна проаналізувати, якщо використовувати когнітивну карту складної системи. Як відомо, когнітивна карта математично являє собою знаковий орієнтований граф G = <V, E> з множиною причинно-наслідкових відносин $E=\{e_{ij}\}$ між множиною його вершин $V=\{v_i\}$, $i,j=1,2,\ldots n$. Вершини – це деякі об'єкти (концепти, сутності) складної системи, наприклад, «Якість життя», «Валовий регіональний продукт», «Ринок праці», «Міграція населення» та ін. Об'єкти (вершини) можуть характеризуватися як кількісно, так і якісно (вербально), що створює важливу перевагу когнітивних моделей, які об'єднують у своїй структурі різні сутності і дозволяють описувати і аналізувати слабоструктуровані проблеми складних систем, що породжуються невизначеністю різного роду.

Для дослідження і опису структурних властивостей графової моделі складної системи в даній роботі були використані методи алгебри теорії графів, а також методи топології – симпліціального (поліедрального) аналізу зв'язності структур (аналізу q-зв'язності) [56, 58, 59, 87, 88].

Алгебраїчний аналіз структурних властивостей когнітивної карти включає аналіз її вершин, шляхів і циклів, аналіз зв'язності, стійкості та ін. Основними характеристиками структури при її аналізі традиційними для теорії графів методами прийнято вважати загальне число зв'язків (визначають складність системи), загальне число взаємодій (визначають стійкість), частота зв'язків (кількість зв'язків, що припадають на один елемент, що визначають інтенсивність взаємодії елементів), кількість внутрішніх зв'язків, які визначають внутрішній устрій системи, кількість зовнішніх зв'язків, які характеризують взаємодію системи із зовнішнім середовищем, її «відкритість». Для аналізу зв'язності соціально-економічних систем в когнітивному імітаційному моделюванні використовуються поняття і визначення зв'язності графа, розрізу, блоків, підграфів, часткових графів, компонентів зв'язності [59, 83, 84].

Топологічний аналіз властивостей складної системи може проводитися на основі побудови і вивчення типу зв'язків її симплексів або виділення симплексів і їх зв'язків (симпліціального комплексу) на когнітивній карті, якщо вона є.

Топологічні дослідження складних систем на основі вивчення їх структурних властивостей були розпочаті в 1960-1970 рр. Математичні основи методу були закладені К. Друкер і отримали розвиток в роботах англійського фізика Р. Еткіна, який розробив перший інструмент симпліціального аналізу, названий q-аналізом. Ці роботи послужили початком дослідження складності структур систем методом q-аналізу або поліедральної динаміки. Найбільш повно метод комбінаторної топології розвинений Дж. Касті [87].

Методика аналізу q-зв'язності дозволяє судити про зв'язності системи більш глибоко, ніж традиційні дослідження зв'язності графа, і впорядковувати оцінювані компоненти в порядку зростання або зменшення зв'язності.

Щоб наочно вивчити зв'язність структури, необхідно розглянути поняття комплексу. Симпліціальний комплекс – це природне математичне узагальнення поняття планарного графа, що відображає багатовимірну природу бінарного

відношення. Оскільки симпліціальний комплекс по суті не що інше, як сімейство симплексів, з'єднаних за допомогою спільних граней, то природною характеристикою зв'язності могла б служити розмірність межі, спільної для двох симплексів. Якщо нас цікавить комплекс в цілому, то більш доцільно використовувати поняття «ланцюг зв'язку», що відображає той факт, що два симплекса можуть не мати спільної межі, але можуть бути зв'язані за допомогою послідовності проміжних симплексів.

Застосування q-аналізу до дослідження соціальних, біологічних, економічних і ін. складних систем показало свою ефективність, оскільки q-аналіз дозволяє розкрити багатовимірну геометрію складних систем, простежити вплив різних локальних змін на структуру системи в цілому, зупинити увагу саме на структурні особливості системи, що не виявляються при інших підходах. Використання цього методу для аналізу структурно складних систем дозволяє по іншому підійти до самого визначення поняття «складність», більш глибоко розкрити роль окремих елементів і їх вплив на інші елементи системи. Одним із прикладів використання поліедральних аналізу в когнітивних дослідженнях соціально-економічних систем є робота [89].

Наведемо ряд необхідних для подальшого викладу відомих понять і визначень [56, 58, 59, 87–90]. У симпліціальному аналізі система розглядається у вигляді відношення між елементами множин: множини вершин V і заданого сімейства непустих підмножин цих вершин – симплексів σ. Множини вершин і відповідних їм симплексів утворюють симпліціальні комплекси K. Для побудови комплексів використовується структура системи, задана у вигляді графа. Структура системи служить підставою для геометричного і алгебраїчного її подання як симпліціального комплексу. Будь-яке відношення λ в системі представляється таким чином, що множина елементів, що відносяться до конкретного елементу v_i (вершині графа), трактується як симплекс $\sigma_p^{(i)}$

(розмірність симплекса p – це кількість ребер, що з'єднують його вершини), а їх сукупність утворює симпліціальний комплекс К.

Отже, симпліціальний комплекс складається з множини вершин $V = \{v_i\}$ і множини $\{\sigma_p^{(i)}\}$ – непустих кінцевих підмножин множини $\{v_i\}$, званих симплекс, таких, що будь-яка множина, що складається рівно з однієї вершини, є симплексом; будь-яка непорожня підмножина симплекса є симплексом, а також порожня множина симплексів є симпліціальним комплексом. Таким чином, симпліціальний комплекс виходить шляхом розбиття деякого простору X на пересічні підмножини (як відомо, простір, що допускає таке розбиття, називається поліедр).

Для коректного здійснення переходу від структури системи G до її симпліціального подання K, що є ключовим моментом в аналізі q-зв'язності структури, експерту (досліднику, аналітику) необхідно задати множину вершин V симпліціального комплексу $K = \{X, Y\}$ і визначити певне відношення або правило, згідно з яким вихідна множина вершин буде розбитою на множину непустих пересічних підмножин – симплексів. Формальний перехід від структури системи, заданої у формі графової моделі, до її моделі у вигляді симпліціального комплексу, не складає труднощів. Але на дослідника лягає відповідальність за чітке уявлення цілей моделювання, вміння правильно виділяти властивості, характеристики системи, необхідні для створення достовірної симпліціальної моделі. Природа і характер зв'язків між елементами структури задають набір відношень λ, в яких ці елементи можуть брати участь. Вибір того чи іншого типу відношень між елементами диктується цілями моделювання, і від достовірності завдання цих відносин залежить, в тому числі, простіша і правильна інтерпретація отриманих результатів симпліціального моделювання.

Нехай побудована когнітивна карта деякої складної системи у вигляді орієнтованого графа $G = \langle V, E \rangle$ (рис. 1.15), матриця суміжності якого $A_G = [a_{ij}]$. Якщо для конкретних цілей поліедрального аналізу складної системи достатньо

вивчення відношень в моделі G, тобто набір відношень a_{ij} (матриця A_G) можна вважати відповідним набору відношень λ_{ij}, що цікавлять дослідника, то структура моделі Λ, досліджуваної методом поліедрального аналізу задається тим же графом G і $\forall\ \lambda_{ij} = a_{ij}$, $A_G = \Lambda_G = [\lambda_{ij}]$.

Для прикладу наводяться результати алгебраіко-топологічного аналізу однієї з когнітивних моделей «Ринок поштових послуг» [17], що ілюструють можливості необхідності подібних досліджень. На рис. 2.14 зображена когнітивна карта, яка відображає одну з можливих структур ринку поштових послуг. Ця модель являє собою взаємозв'язок і взаємовплив між експертно виділеними концептами (вершинами *Vi* когнітивної карти), що характеризують цей ринок з загальних позицій.

Алгебраїчна модель цієї системи задається множиною з 9 елементів $\{Vi\}$ і множиною відносин $\{Vi,Vj\}$ між ними:

$$M=\{V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9\}: \{(V1,V2), (V1,V5), \ldots,(V9,V6), (V9,V1)\},$$

де *V1* – Економічний розвиток (Economic development), *V2* – Рівень життя (Standard of living), *V3* – Попит на поштові послуги (Demand for postal services), *V4* – Постачання поштових послуг (Supply of postal services), *V5* – Розвиток інформаційно-комунікаційних технологій (Development of information and communication technologies), *V6* – Вартість поштових послуг (Cost of postal services), *V7* – Державне регулювання (State regulation), *V8* – Якість поштових послуг (Quality of postal services), *V9* – Кількість поштових послуг (Number of postal services).

Геометрична модель ринку поштових послуг – когнітивна карта у вигляді знакового орієнтованого графа G = <V, E> зображена на рис. 2.14. На рис. 2.14 суцільними лініями зображені дуги позитивного (+1) впливу між вершинами, пунктирними – негативного (–1) впливу. У методах і алгоритмах для дослідження структури когнітивної карти використовувалася її матриця суміжності

$$A_G = \{a_{ij}\} = \begin{cases} 1, & if \quad V_i \ is \ connected \ with \ \ V_j \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

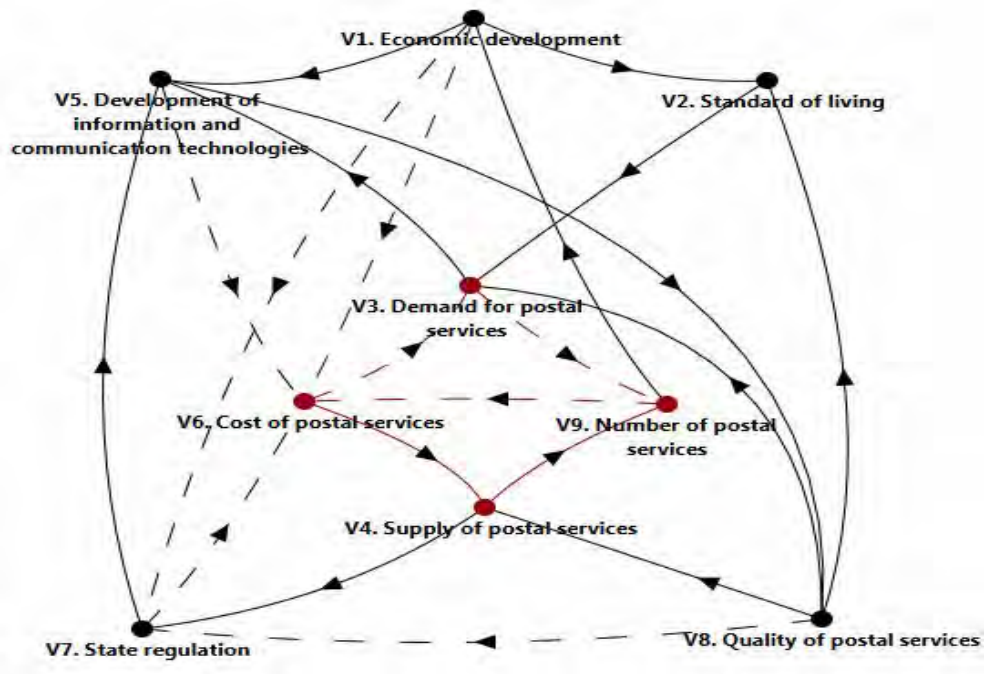


Рисунок 2.14 – Когнітивна карта G «Ринок поштових послуг»

У таблиці 2.5 наведені дані матриці суміжності когнітивної карти G «Ринок поштових послуг».

Таблиця 2.5 – Граф матриці суміжності «Ринок поштових послуг»

Connectivity matrix

- Infl./ Dep.	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
V1	×	1.0			1.0	-1.0	-1.0		
V2		×	1.0						
V3			×		1.0				-1.0
V4				×			1.0		1.0
V5					×	-1.0		1.0	
V6			-1.0	1.0		×			
V7					1.0	-1.0	×		
V8		1.0	1.0	1.0			-1.0	×	
V9	1.0					-1.0			×

У таблиці 2.6 і на рисунках 2.15–2.17 зображені результати дослідження когнітивної карти методами теорії графів.

Таблиця 2.6 – Аналіз валентності вершин графа G

Graph properties

Vertices: 9. Edges: 21.

Vertex	p	p+	p-
V1. Economic development	5	1	4
V2. Standard of living	3	2	1
V3. Demand for postal services	5	3	2
V4. Supply of postal services	4	2	2
V5. Development of information and communication technologies	5	3	2
V6. Cost of postal services	6	4	2
V7. State regulation	5	3	2
V8. Quality of postal services	5	1	4
V9. Number of postal services	4	2	2

Max: p = 6: V6. Cost of postal services

Entrance (Hole): 0

Exit (Star): 0

Export data Close

Аналіз ступеня (валентності) вершин графа G. Дослідження необхідно для аналізу проблем послідовності ступенів графа, визначення його загальних властивостей, виявлення шляхів з визначенням властивостей (наприклад, Ейлерових) і подальшого використання цих результатів у побудові графа з бажаними якостями.

1) **Аналіз шляхів графа G**. Дослідження необхідно з позицій експертного аналізу шляхів графа на несуперечливість причинно-наслідковим ланцюжкам реальної складної системи, а також з метою вибору кращих шляхів з вершини до вершини з позицій прийнятого критерію оптимальності. На рис. 2.14 зображені позитивний (нульове або парне число дуг) і негативний (непарне число дуг) шляхи з вершини V7 – Державне регулювання (State regulation) до вершини V2 – Рівень життя (Standard of living). Всього таких шляхів 11.

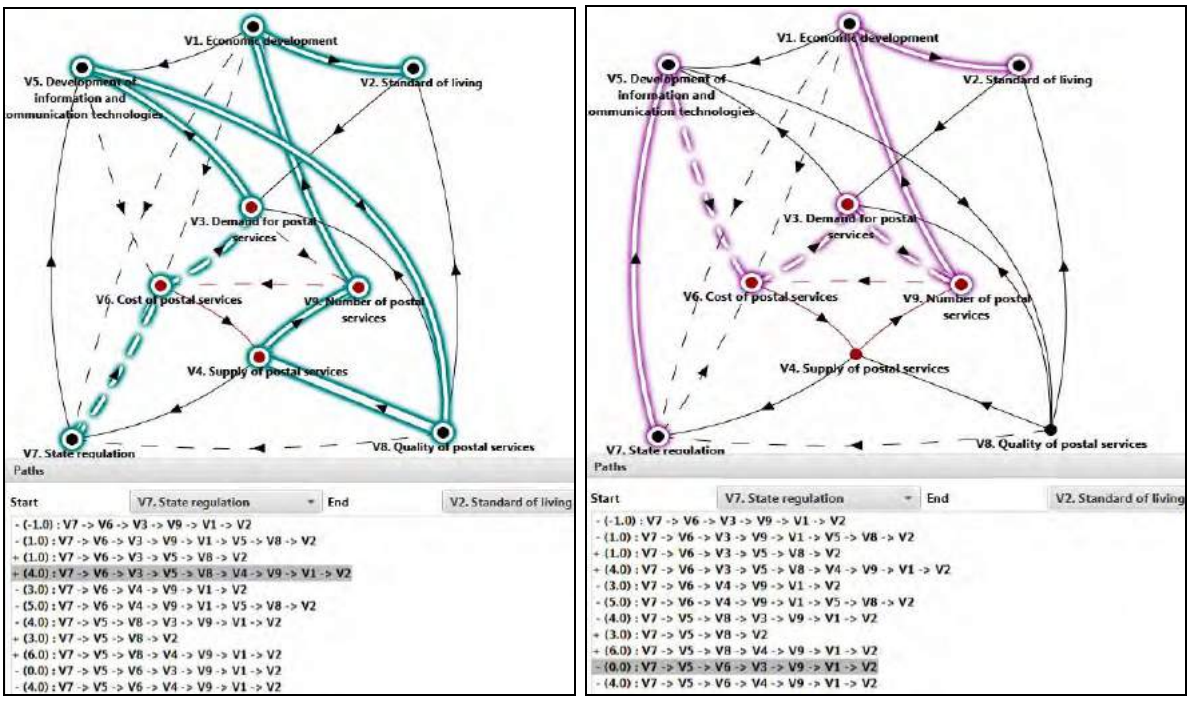


Рисунок 2.15 – Виділення шляху з вершини V7 – Державне регулювання (State regulation) до вершини V2 – Рівень життя (Standard of living)

Перегляд всіх шляхів когнітивної карти показав їх логічну несуперечливість.

2) **Аналіз циклів графа** G. Дослідження необхідно з позицій експертного аналізу циклів графа на несуперечливість циклам рельної складної системи, визначення числа позитивних (парне число позитивних дуг в циклі) і негативних (непарне число позитивних дуг в циклі) циклів когнітивної карти і їх співвідношення – для аналізу структурної стійкості системи. На рис. 2.16 наведено графічне представлення отриманих результатів, виділені один з позитивних (підсилювачів процесів) і один з негативних (стабілізуючих) циклів зворотного зв'язку.

У моделі спостерігається 39 циклів, з яких 17 – негативних. Непарне число негативних циклів зворотного зв'язку свідчить про структурну стійкість системи [56].

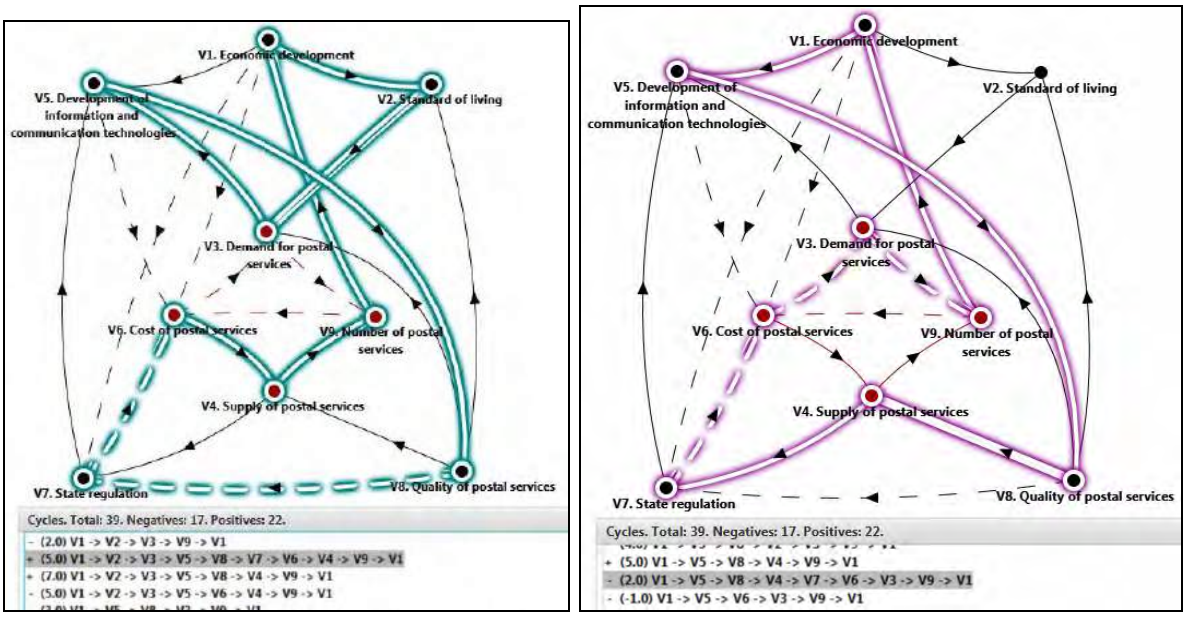


Рисунок 2.16 – Визначення циклів когнітивної карти *G*

3) **Симпліціальний аналіз**. Розглянемо результати визначення симплексів і симпліціальних комплексів на прикладі когнітивної карти «Ринок поштових послуг». На рис. 2.17 і 2.18 зображені результат симпліціального аналізу графа G з виділенням симплексів розмірності $p = 3$ по рядках (множина X) і стовпчиках (множина Y). На рис. 2.18 елементи q-зв'язності свідчать про те, що кожен симплекс в ланцюзі має загальну вершину з сусідніми симплексами; $q = 0, 1, 2, 3$ і в комплексі K_x, і в комплексі K_y.

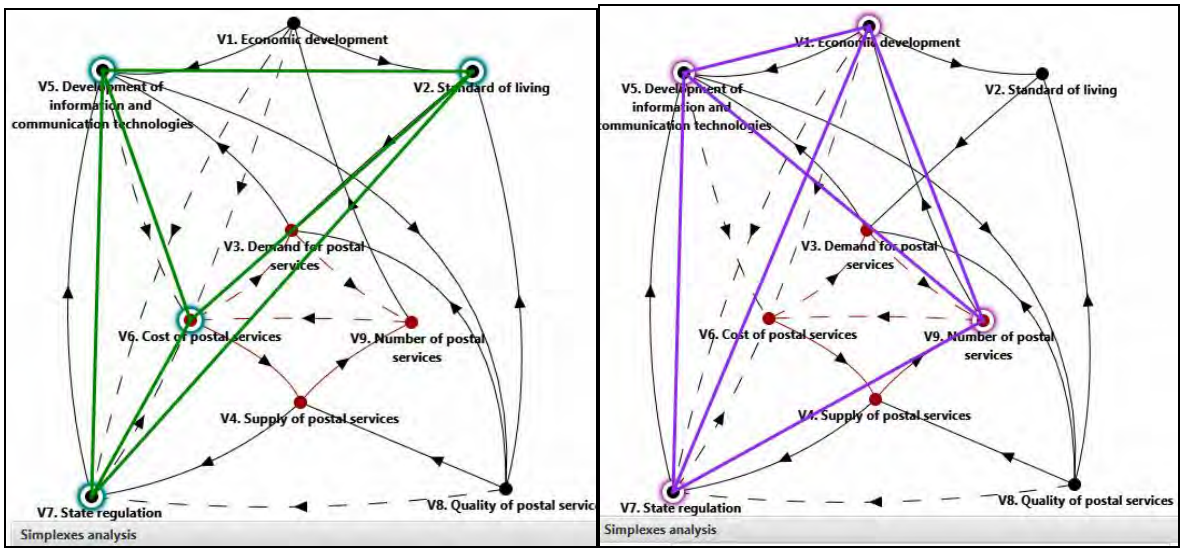


Рисунок 2.17 – Представлення симплексів p =3 комплексів K_x, и K_y

Simplexes analysis

Infl./ Dep.	V6	V7	V3	V5	V4	V2	V9	V1	V8	p=k-1
V1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	3
V8	0	1	1	0	1	1	0	0	0	3
V7	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
V4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
V3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
V6	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
V5	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
V9	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
[illegible]	0	0	1	0	0	0	0	0	0	[illegible]
p=k-1	3	2	2	2	1	1	1	0	0	

q = 3, Q3 = 2, {V1}, {V8}
q = 2, Q2 = 2, {V1}, {V8}
q = 1, Q1 = 5, {V4}, {V1, V7, V8, V6}, {V3}, {V5}, {V9}
q = 0, Q0 = 1, {V1, V7, V4, V8, V3, V6, V2, V5, V9}

q = 3, Q3 = 1, {V6}
q = 2, Q2 = 4, {V7}, {V3}, {V6}, {V5}
q = 1, Q1 = 4, {V7, V2}, {V4, V3}, {V6, V5}, {V9}
q = 0, Q0 = 1, {V7, V1, V4, V8, V3, V6, V2, V5, V9}

Qx = (2 2 5 1)
Qy = (1 4 4 1)

Рисунок 2.18 – Результати симпліціального аналізу графа G

Симпліціальні комплекси утворені множиною всіх симплексів:

$$K_x = \left\{\sigma_3^{V1}, \sigma_3^{V8}, \sigma_1^{V7}, \sigma_1^{V3}, \sigma_1^{V6}, \sigma_1^{V4}, \sigma_1^{V5}, \sigma_1^{V9}, \sigma_0^{V8}\right\};$$

$$K_y = \left\{\sigma_3^{V6}, \sigma_2^{V8}, \sigma_2^{V7}, \sigma_2^{V3}, \sigma_1^{V6}, \sigma_1^{V4}, \sigma_1^{V5}, \sigma_0^{V9}, \sigma_0^{V8}\right\};$$

Q – структурні вектора комплексів показують, скільки і які q-зв'язності утворюють відповідний комплекс. Структурні вектори мають вигляд:

$$Q_x = \begin{pmatrix} q=3 & q=2 & q=1 & q=0 \\ Q3=2 & Q2=2 & Q1=5 & Q0=1 \end{pmatrix}$$

$$Q_y = \begin{pmatrix} q=3 & q=2 & q=1 & q=0 \\ Q3=1 & Q2=4 & Q1=4 & Q0=1 \end{pmatrix}$$

Геометрично симплекс розмірністю p=3 є тетраедром, наприклад, симплекс σ_3^{V1} має вигляд (а), симплекс σ_1^{V7} розмірністю p=1 має вигляд (б), симплекс σ_0^{V8} розмірністю p=0 має вигляд (в), рис. 2.19.

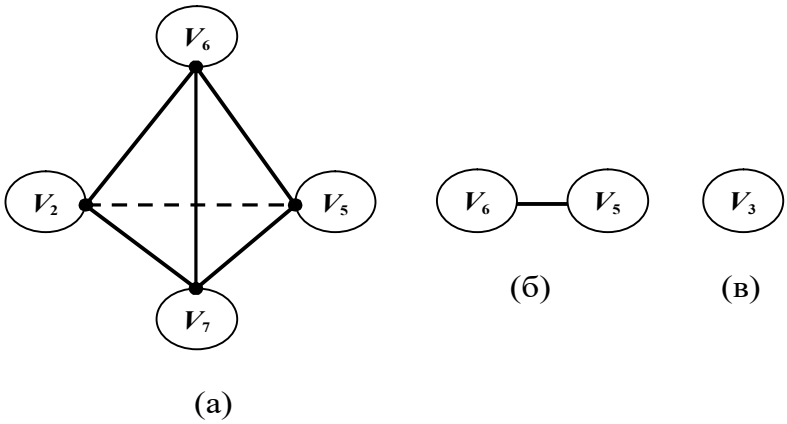


Рисунок 2.19 – Зображення окремих симплексів комплекса K_x

На рис. 2.20 представлено симпліціальний комплекс K_x.

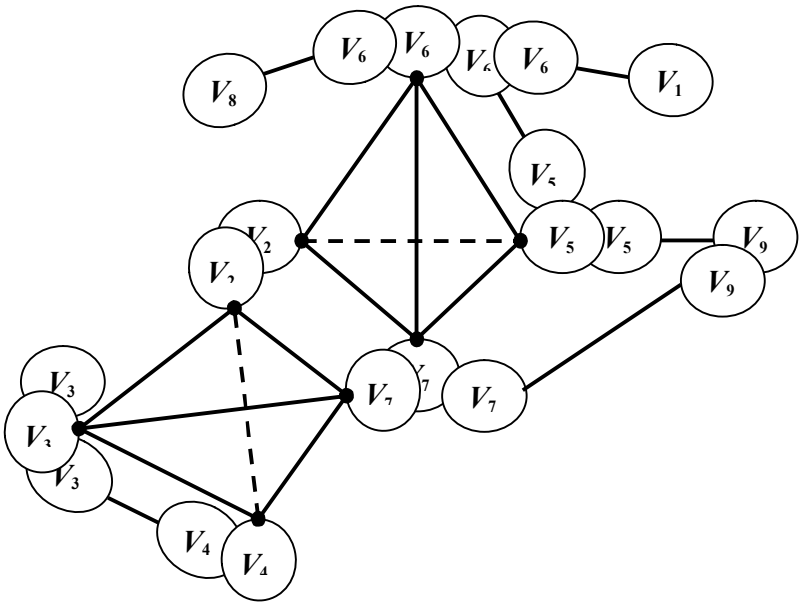


Рисунок 2.20 – Зображення симпліціального комплексу K_x

Зображення симпліціального комплексу K_x на рис. 2.19 ілюструє результати симпліціального аналізу на рис. 2.17. Так, є два симплекса $\sigma_3^{(1}$ і $\sigma_3^{(8)}$ розмірністю p = 3, пов'язані ребром e_{27}, два Q2 = 2 симплекса $\sigma_1^{(7)}$ і $\sigma_1^{(6)}$ розмірністю p = 1, пов'язані ребрами з симплексами $\sigma_3^{(1)}$ и $\sigma_3^{(8)}$, є 5 симплексів, пов'язаних тільки вершинами. Структура когнітивної карти, її зв'язність істотно впливають на характер процесів в ній.

У подальших дослідженнях буде показано застосування симпліціального аналізу до підземного будівництва.

2.6 Застосування інструментів текстової аналітики для збору і класифікації інформації щодо використання підземного простору

Збір переліку джерел з тематики інфраструктури великих міст. Збір джерел є невід’ємною частиною будь-якого аналітичного процесу. Він складається з наступних етапів:

1. Пошук джерел серед видань у електронному виді;
2. Збір переліку джерел, що відповідають тематиці дослідження;

3. Дослідження зразків джерел щодо необхідності конвертації чи додаткового перетворення, а саме
    a. Збір переліку посилань з джерел;
    b. Видобуття зразків інформаційних одиниць з джерел;
    c. Помітка про необхідність конвертації у інший формат;
    d. Помітка про необхідність розпізнавання тексту з зображень.
4. Планування залучення ПЗ та підготовка засобів обробки інформації з джерел.

Предметна галузь дослідження – інфраструктура міста, зокрема її підземні споруди та наземні об’єкти, що є критичними для міста. Беззаперечно, основнім джерелом інформації про такі об’єкти інфраструктури є «Генеральний план м. Києва до 2025 р.» та інші офіційні документи, проте різноманіття зв’язків таких об’єктів із різноманітними ситуаціями може бути накоплена з новин та публікацій спеціалізованих та загальних джерел та з окремих публікацій, присвячених цій тематиці.

Перелік джерел для видобування знань щодо тематики інфраструктури великих міст. У процесі аналізу предметної галузі було зареєстровано 8 основних джерел знань, з них:

- 4 прямих посилань на документи
- 2 україномовних джерела
- 2 англомовних джерела

Перелік зареєстрованих джерел щодо тематики інфраструктури великих міст наведено у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Перелік джерел щодо тематики інфраструктури великих міст

№	Назва джерела	Посилання	Примітка
1	КО «Київгенплан»: Основні положення Генерального плану міста Києва	https://drive.google.com/open?id=1HmqVLp25d4PFL08EuLAQ9O8KEFYbhOo5	
2	Історико-архітектурний опорний план Києва	https://drive.google.com/open?id=1NADRSzQhy5IdRWfgbWqPkbNmjuKSSIdD	
3	Генеральний план міста Києва на період до 2020 року (діючий)	https://kga.gov.ua/generalnij-plan/genplan2020	
4	Генеральний план розвитку м. Києва та його приміської зони до 2025 року (проєкт)	http://kievgenplan.grad.gov.ua/generalnyj-plan/	
5	Міські проєкти	https://kga.gov.ua/informatsijna-sistema-komfortnij-prostir	13 посилань
6	Офіційний портал Києва	https://kyivcity.gov.ua/mistobuduvannia_ta_zemelni_dilianky/operatsii_iz_zemelnymy_diliankamy/	Посилання на декілька розділів, потребує парсінг
7	Underground Construction	https://ucononline.com	Парсінг, адаптація мови за ключами
8	Wikipedia References: Underground construction	https://en.wikipedia.org/wiki/Underground_construction	Парсінг, адаптація мови за ключами

Дослідження зразків джерел. Зібрано реєстр посилань на кінцеві документи. Було видобуто окремі документи та проаналізовано щодо необхідності додаткової обробки:

- Окремі документи у форматі PDF (з джерел 1–6, 8) потребують конвертації у безпосередньо текст.
- Тексти джерел потребують очищення.
- Інформаційні одиниці англомовних джерел можливо збагатити тематичними класами, що є на окремих сторінках.

Планування залучення ПЗ та підготовка засобів обробки інформації з джерел. Для видобування джерел, їх обробки та зберігання використано наступний набор ПЗ:

1. Збір (скрипти на мові python):

1.1. python liburl2/librequests

1.2. python scrapy

2. Парсінг вмісту:

2.1. python lxml

2.2. python bs4

3. Збереження:

3.1. python json

3.2. Elasticsearch + Elasticsearch python [91]

4. Очищення та обробка:

4.1.Україномовні джерела:

4.1.1. очищення – скрипт python

4.1.2. обробка речень – скрипт python

4.1.3. лематизація pymorphy2 [52]

4.2. Англомовні джерела:

4.2.1. очищення – python spaCy [92]

4.2.2. NER, PoS, лематизація - python spaCy

4.2.3. векторизація – libgensim

5. Робочий пайплайн та візуалізація:

5.1. Kibana (Elasticsearch) [91]

5.2. python pandas/matplotlib

Видобування та збереження джерел. За своєю природою у проекті розділимо джерела на регулярні та нерегулярні. Джерела, що не є регулярними публікаціями та видобуваються вручну, завантажені та збережені на сервері у папці. Джерела, що є регулярними, видобуваються за допомогою засобів для збору. Такі засоби

налаштовані на сервері, щоб поповнювати інформацію через деякий час, у нашому випадку – щотижнево.

Для регулярного видобування використовується гіпервізор із пакету supervisord та наступний алгоритм:

1. Збираються посилання на інформаційні одиниці (рис. 2.21).
2. Інформаційні одиниці перевіряються на унікальність відносно існуючої бази.
3. Витягуються лише ті, що є новими (після перевірки, див. крок 2).
4. Проводиться операція парсингу, з вузлів html-розмітки видобуваються дані (рис. 2.22).
5. Зміст вивантажується у JSON та завантажується до elasticsearch (рис. 2.23), що забезпечує базові функції навігації, перегляду, індексації та пошуку (рис. 2.24).


```
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/duke-energy-moves-ahead-with-ohio-gas-pipeline-application"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/illinois-american-water-to-acquire-alton-s-regional-wastewater-system"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/columbia-gas-of-maryland-seeks-rate-increase-for-pipeline-replacement-projects"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/fears-of-sewer-pipe-collapse-close-3-blocks-of-major-street"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/west-virginia-american-water-launches-2018-infrastructure-upgrade-map"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/application-filed-for-405-million-gas-pipeline-project"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/michigan-lawmakers-seek-action-to-reopen-flint-water-sites"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/25-million-awarded-to-train-and-assist-small-drinking-water-and-wastewater-systems"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/mountain-valley-pipeline-north-carolina-expansion-proposed"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/california-water-pipeline-repairs-scheduled-residents-urged-to-reduce-usage"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/construction-begins-on-46-million-sewer-water-project-in-new-york-city"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/new-york-to-award-15-million-for-electric-grid-modernization-projects"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/sewer-spill-fouls-creek-wetlands-in-north-florida"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/water-agency-approves-11b-for-california-twin-tunnels-plan"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/michael-baker-names-irby-butler-waterwastewater-regional-construction-services-practice-lead"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/north-carolina-agency-says-chemical-makers-lied"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/pennsylvania-regulators-develop-tool-to-improve-chesapeake-bay-water-quality"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/twin-tunnels-considered-again-for-california-water-project"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/canadian-gas-pipeline-system-expanded-again"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/cable-hdd-shore-end-suppliers-chosen-for-lake-ontario-project"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/illinois-american-water-acquires-city-of-farmington-water-system"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/juniper-capital-management-acquires-sewer-rehabilitation-companies"},
{"article_url": "https://ucononline.com/news/2018/04/michigan-to-close-flints-free-bottled-water-sites"},
```


Рисунок 2.21 – Приклад структури даних із посиланнями на інформаційні одиниці

```
["New Orleans could get up to $111 Million Loan for Sewer Upgrades"], "news_date": ["10/22/2019"], "news_body": "NEW ORLEANS (AP) \u2014 The Ei
["USDA to Invest Over $630 Million in Water Improvement for Rural Communities"], "news_date": ["11/20/2019"], "news_body": "The U.S. Department
["USDA Investing in Coastal Maine Sewer Improvements"], "news_date": ["10/22/2019"], "news_body": "BOOTHBAY HARBOR, Maine (AP) \u2014 The feder
["Discussions Continue on Potential Combining of NACE International and SSPC"], "news_date": ["10/23/2019"], "news_body": "Last month the joint
["Sewer Pipe Leaks in Northeast Portland"], "news_date": ["10/23/2019"], "news_body": "PORTLAND, Ore. (AP) \u2014 A sewer pipe in Northeast Por
["Doosan Infracore Demonstrates Automated Construction Site Solution"], "news_date": ["11/21/2019"], "news_body": "Doosan Infracore (DI) has ur
["Sewer Flows Cause Sinkhole in Road, 2 Injured"], "news_date": ["10/21/2019"], "news_body": "BOSSIER CITY, La. (AP) \u2014 A car in Louisiana
["Stricter EPA Lead Rule Could Boost Water Pipe Replacement Demand"], "news_date": ["10/16/2019"], "news_body": "HOUSTON (UC) \u2014 The Envirc
["Brooklyn Residents Upset Over \u201cMassive Havoc\u201d Caused by Infrastructure Project"], "news_date": ["10/15/2019"], "news_body": ""},
["Nick Stavropoulos to Lead Safety Efforts for Columbia Gas of Massachusetts"], "news_date": ["10/16/2019"], "news_body": "(UC) \u2014 Columbia
["Weldbend, Boltex Win False-Claims Lawsuit Against Ulma Forja"], "news_date": ["10/14/2019"], "news_body": "HOUSTON (P&GJ) \u2014 A jury retur
["FERC Issues Final HDD Monitoring, IR Response Guidance"], "news_date": ["10/11/2019"], "news_body": "HOUSTON (UC) \u2014 The Federal Energy R
["Cranbrook, B.C. Completes Sewer Relining Project"], "news_date": ["10/9/2019"], "news_body": "(UC) \u2014 The City of Cranbrook, British Colu
["Belfast Completes $5.5 Million Sewer Upgrade Project"], "news_date": ["10/9/2019"], "news_body": "(UC) \u2014 NI Water has completed a $5.5 m
["Water Environment Federation Names MS4 Award Winners"], "news_date": ["10/9/2019"], "news_body": "(UC) \u2014 Twenty-two high-performing muni
["Proposed Standard to Support Water Main Pipe Rehabilitation"], "news_date": ["10/9/2019"], "news_body": "ASTM International said its \nis dev
["Lane Wins First Washington Contract with $255 Million Seattle Project"], "news_date": ["10/9/2019"], "news_body": "(UC) \u2014 Lane Construct
["Columbia Gas Ordered to Seek State Approval for All Non-Emergency Work"], "news_date": ["10/6/2019"], "news_body": "LAWRENCE, Mass. (AP) \u2
["Mass. Officials Order Additional Safety Measures After Gas Leak"], "news_date": ["10/5/2019"], "news_body": "LAWRENCE, Mass. (AP) \u2014 Mass
["City Hit By Explosions A Year Ago Sees Gas Leak, Evacuations"], "news_date": ["10/4/2019"], "news_body": "BOSTON (AP) \u2014 A gas leak force
["Colorado Company Fined $31K for Fatal Trench Collapse"], "news_date": ["10/9/2019"], "news_body": "FORT COLLINS, Colo. (AP) \u2014 The Occupa
["Queens, New York Breaks Ground on $139 Million Upgrade Project"], "news_date": ["10/1/2019"], "news_body": "(QUEENS, New York) \u2014 A New Y
["Plaquemines Parish Gets $4 million for Water Infrastructure"], "news_date": ["10/1/2019"], "news_body": "BELLE CHASSE, La. (AP) \u2014 The fe
```


Рисунок 2.22 – Приклад структури даних за посиланнями на інформаційні одиниці після парсингу

Парсинг проводиться засобами бібліотек python lxml/scrapy (рис. 2.20), витягуються 3 доступних поля.

```
item['news_title'] = response.xpath('//div[@id="main"]//div[@id="left"]/h1[@class="article-title"]/text()').extract()
item['news_date'] = response.xpath(
    '//div[@id="main"]//div[@id="left"]/div[@class="date-line"]/text()').extract()
item['news_body'] = "\n".join(response.xpath('//div[@id="main"]//div[@id="left"]//p/text()').extract())

yield (item)
```

Рисунок 2.23 – Приклад коду для парсингу новин джерела №7 з табл. 2.7

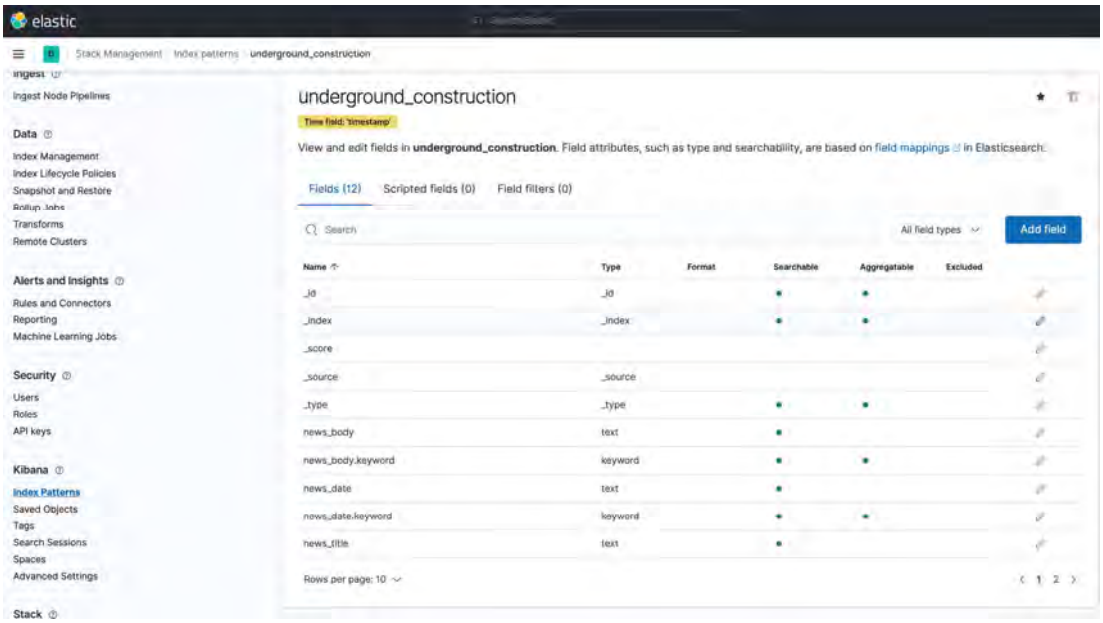


Рисунок 2.24 – Приклад реєстрації інформаційних одиниць новин джерела №7 з табл. 2.7 як індексу у elasticsearch

Після індексації у elasticsearch, джерела інформації доступні для навігації та пошуку. У інтерфейсі Kibana у вигляді діаграми (рис. 2.25) виводиться інформація щодо часу надходження інформаційних одиниць та їх кількості. Індексація проводиться за всіма текстовими полями, тому пошук є доступним за будь-яким полем з індексованих: змістом новини чи заголовком. Можна вказати проміжок часу для уточнення результатів. Через інтерфейс можна спостерігати за ритмічністю публікацій та коректувати проміжки часу збору кожного джерела. Для кожного джерела використовується окремий індекс з власною структурою з доступних типів полів, що наявні з парсингу.

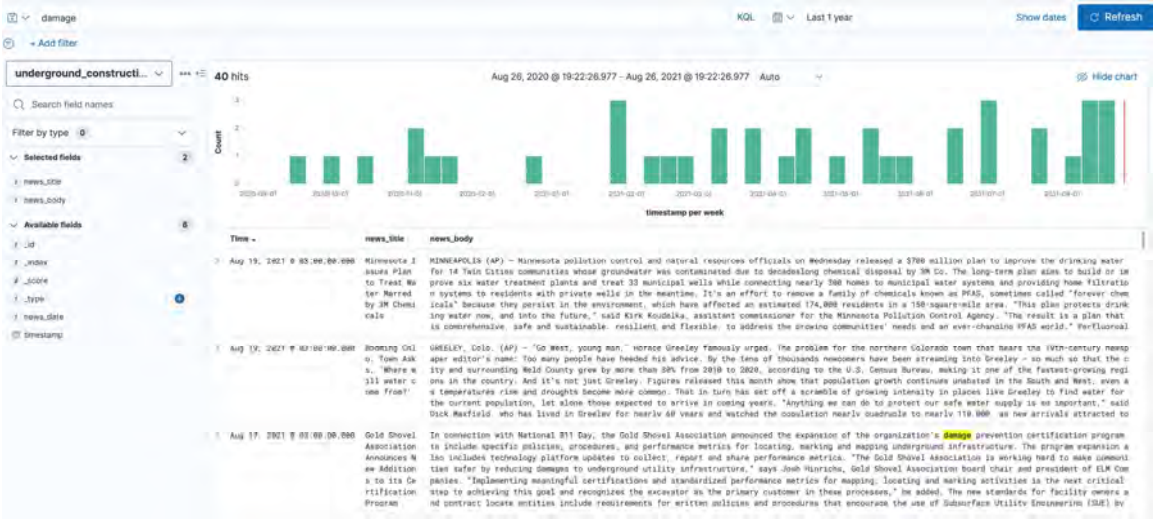


Рисунок 2.25 – Приклад збереження, пошуку та навігації по даним у elasticsearch

<u>Очищення корпусу (скрипт на мові python)</u>. Очищення корпусу необхідно для вилучення артефактів, що заважають виділенню смислових концептів з текстів документів через утворення зайвого «інформаційного шуму» та через те, що вони знаходяться на занадто близький дистанції до об’єктів пошуку та утворюють зайві неіснуючі зв’язки. Експериментально було опрацьовано процедуру у декілька етапів, що надали найбільшій результат при найменших затратах процесорного часу для різних корпусів. Ця процедура складається з наступних етапів:

1. Для україномовних ресурсів:

1.1. Розбиття по розділювачам – поділення тексту на фрагменти.

1.2. Очищення по довжині – вилучення слів, довжиною менших за 2.

1.3. Вилучення зайвих букв:

- _currency = r"\$ £ € ¥ ฿ US\$ C\$ A\$ ₽ ريال ₴"
- _punct = (r"… …… , : ; \! \? ¿ ¿ ¡ \(\) \[\] \{ \} < > _ # * & 。 ？ ！ ， 、 ； ： ～ · । ¡ - º ⁄.")
- _quotes = r'\' " ” “ ` ‘ ´ ’ , , „ » « 「 」 『 』 ( ) 〔 〕 【 】 《 》 〈 〉 '

1.4. Очищення за частиною мови ['INTJ', 'PRCL', 'CONJ', 'PREP', 'PRED', 'NPRO', None (не визначено)]).

2. Для англомовних текстів:

2.1. Розбиття по розділювачам – поділення тексту на фрагменти. Бібліотека spaCy, процессор ‘en_core_web_sm’, модуль nlp().sents.

2.2. Вилучення зайвих слів, букв та символів (["%", "#", "", «*»], набір spaCy is_stop).

2.3. Очищення за частиною мови.

Лематизація текстів корпусу (pymorphy2, spaCy) з очищенням. У результаті процедури очищення видаляються частини мови, що позначені в таблиці 2.8 у графі «видалено». Інші, вказані у таблиці, залишаються. Бібліотеки мають схожі принципи іменування PoS.

Таблиця 2.8 – Частини мови, що розпізнають бібліотеки pymorphy2 та spaCy

грамема	**значення**	**приклади**	**видалено**
NOUN	іменник	хом'як	ні
ADJF	прикметник (повне)	хороший	ні
ADJS	прикметник (короткий)	хороший	ні
COMP	компаратив	краще, вище	ні
VERB	дієслово (особиста форма)	кажу, каже, говорив	ні
INFN	дієслово (інфінітив)	говорити, сказати	ні
PRTF	причастя (повне)	прочитав, прочитана	ні

грамема	значення	приклади	видалено
PRTS	причастя (короткий)	прочитана	ні
GRND	дієприслівник	прочитавши, розповідаючи	ні
NUMR	числівник	три, п'ятдесят	ні
ADVB	прислівник	круто	ні
NPRO	займенник-іменник	він	ні
PRED	предікатив	колись	ні
PREP	прийменник	в	так
CONJ	Союз	і	так
PRCL	частинка	б, ж, лише	так
INTJ	вигук	ой	так

Приклад фрагменту обробленого тексту (у вигляді списків слів у реченнях) для україномовних текстів наведено нижче:

['сталии', 'розвиток', 'київ', 'визначаймося', 'збалансовані', 'функціонування', 'забезпечення', 'економічні', 'зростання', 'потреба', 'населення', 'одночасні', 'поліпшення', 'екологічні', 'стан', 'міські', 'середовище', 'ціле', 'раціональні', 'використання', 'ресурс', 'число', 'природні', 'технологічні', 'переоснащення', 'підприємство', 'удосконалення', 'соціальноа', 'виробничоа', 'транспортноа', 'інженерноа', 'інфраструктура', 'поліпшення', 'умова', 'проживання', 'відпочинок', 'оздоровлення', 'збереження', 'збагачення', 'природні', 'ландшафт', 'культурноа', 'спадщина'], ['інвестиціина', 'привабливість', 'зростаймо'], ['тривалі', 'падіння'], ['інвестиції', 'основнии', 'капітал', 'розрахунок', 'душа', 'населення', 'кий', 'зростімо'], ['украіна', 'становімо'], ['будьмо', 'наивищі', 'показник', 'регіон', 'украіна'], ['потужність', 'заклад', 'училище', 'забезпечуймо', 'надання', 'повноа', 'середньоа', 'освіта', 'дитина', 'відповідні', 'віко', 'поглиблення', 'знання', 'зацікавлені', 'первинні', 'професіина', 'підготовка', 'потребуймо'].

Відкриті засоби обробки текстів, навіть із застосуваннями власного розробленого набору словників української мови, не такі досконалі, тому серед речень зустрічаються артефакти. Проте вдосконалення словників не є метою цієї роботи.

Приклад фрагменту обробленого тексту (у вигляді списків слів у реченнях) для англомовних текстів наведено нижче (рис. 2.26):

Out[63]:

	0	nlp	clean
324	The planned new tunnel on the Potomac and Green Infrastructure will further reduce CSOs.	(The, planned, new, tunnel, on, the, Potomac, and, Green, Infrastructure, will, further, reduce, CSOs, .)	planned new tunnel Potomac Green Infrastructure reduce cso
749	The primary author of the House bill, Rep. Peter DeFazio, D-Ore., said the investment being proposed would allow the country to repair bridges, roads and tunnels, thereby increasing the country's ...	(The, primary, author, of, the, House, bill, ,, Rep., Peter, DeFazio, ,, D, -, Ore., ,, said, the, investment, being, proposed, would, allow, the, country, to, repair, bridges, ,, roads, and, tunn...	primary author House bill Rep. Peter DeFazio D Ore. say investment propose allow country repair bridge road tunnel increase country economic competitiveness tackle call country new existential cha...
830	(AP) — The U.S. Army Corps of Engineers said it would conduct an extensive review of Enbridge Energy's plan to build an oil pipeline tunnel beneath a Great Lakes channel in Michigan, which could s...	((, AP,), —, The, U.S., Army, Corps, of, Engineers, said, it, would, conduct, an, extensive, review, of, Enbridge, Energy, 's, plan, to, build, an, oil, pipeline, tunnel, beneath, a, Great, Lakes...	AP U.S. Army Corps Engineers say conduct extensive review Enbridge Energy plan build oil pipeline tunnel beneath Great Lakes channel Michigan significantly delay project
831	The tunnel would house a replacement for a portion of Enbridge's Line 5 that crosses the bottom of the Straits of Mackinac, a roughly 4-mile-long (6.4-kilometers-long) waterway connecting Lake Hur...	(The, tunnel, would, house, a, replacement, for, a, portion, of, Enbridge, 's, Line, 5, that, crosses, the, bottom, of, the, Straits, of, Mackinac, ,, a, roughly, 4, -, mile, -, long, (, 6.4, -, k...	tunnel house replacement portion Enbridge line 5 cross Straits Mackinac roughly 4 mile long 6.4 kilometer long waterway connect Lake Huron Lake Michigan
832	Michigan's Department of Environment, Great Lakes and Energy has issued a permit for the $500 million tunnel, but approval from the Army Corps also is needed.	(Michigan, 's, Department, of, Environment, ,, Great, Lakes, and, Energy, has, issued, a, permit, for, the, $, 500, million, tunnel, ,, but, approval, from, the, Army, Corps, also, is, needed, .)	Michigan Department Environment Great Lakes Energy issue permit $ 500 million tunnel approval Army Corps need
...	...	...	...
39857	SACRAMENTO, Calif. (AP) – Southern California's largest water supplier has bought sprawling farmland that could be used to help build twin tunnels under the Sacramento-San Joaquin River Delta.	(SACRAMENTO, ,, Calif., (, AP,), –, Southern, California, 's, largest, water, supplier, has, bought, sprawling, farmland, that, could, be, used, to, help, build, twin, tunnels, under, the, Sacram...	SACRAMENTO Calif. AP Southern California large water supplier buy sprawl farmland help build twin tunnel Sacramento San Joaquin River Delta
39861	San Joaquin and Contra Costa counties oppose the tunnels and filed suit against Metropolitan.	(San, Joaquin, and, Contra, Costa, counties, oppose, the, tunnels, and, filed, suit, against, Metropolitan, .)	San Joaquin Contra Costa county oppose tunnel file suit Metropolitan
40337	As reported by , authorities in central Mexico discovered thieves constructed a tunnel and camouflaged trucks aiming to steal and transport fuel from government pipelines.	(As, reported, by, , ,, authorities, in, central, Mexico, discovered, thieves, constructed, a, tunnel, and, camouflaged, trucks, aiming, to, steal, and, transport, fuel, from, government, pipelin...	report authority central Mexico discover thief construct tunnel camouflage truck aim steal transport fuel government pipeline
40338	Police found the tunnel in the state of Guanajuato, earlier this month.	(Police, found, the, tunnel, in, the, state, of, Guanajuato, ,, earlier, this, month, .)	Police find tunnel state Guanajuato early month
40341	In early April, authorities found a 45-foot long tunnel built under fuel pipelines; it allowed thieves to drill taps undetected and transport fuel by hoses to a lot where the camouflaged trucks th...	(In, early, April, ,, authorities, found, a, 45, -, foot, long, tunnel, built, under, fuel, pipelines, ;, it, allowed, thieves, to, drill, taps, undetected, and, transport, fuel, by, hoses, to, a,...	early April authority find 45 foot long tunnel build fuel pipeline allow thief drill tap undetected transport fuel hose lot camouflage truck collect steal gasoline

401 rows × 3 columns

Рисунок 2.26 – Приклад фрагменту очищеного англомовного тексту

Вилучення знань із зібраних текстів. Простішим прийомом вилучення знань є побудова дерев/графів знань [93] за допомогою правил вилучення фрагментів тексту, що формують словосполучення з урахуванням семантичних ролей між сутностями. Для вилучення сутностей та концептів застосовується семантичний розбір речення після маркування POS-тегів щодо слів у реченні. Далі, ці сутності вилучаються та вилучається дієслово, що формує семантичну роль. Цей підхід є недосконалим, так як вилучає тільки близькі сутності та не враховує асоціативно або контекстно близькі поняття на відстані декількох слів.

Дослідимо деякі графи знань з домену підземних та надземних об’єктів за наступними ключами (з переліку типових міста Київ). За вказаними ключами кожний граф дозволяє виділити наступні потенційно пов’язані поняття (табл. 2.9).

Таблиця 2.9 – Ключі і потенційно пов’язані поняття для домену підземних та надземних об’єктів

Ключ	Потенційно пов’язані поняття
1. Тунель	1.1 Вода
	1.2 Затоплення
	1.3 Каналізація
	1.4 Діаметр сегменту тоннеля
	1.5 Платний
2. Пожежа	2.1 Сотні смертей
	2.2 Газ
	2.3 Вибух
	2.4 Перерва в електропостачанні
3. Вибух	3.1 Руйнування будинків
	3.2 Вибух газу
	3.3 Пожежа
	3.4 Виток газу
4. Руйнування	4.1 Пошкодження магістралі
	4.2 Пошкодження водою (повінь)
	4.3 Пошкодження унаслідок робіт
	4.4 Пошкодження автівок через руйнування дороги
	4.5 Руйнування через погодні умови (ураган, шторм)
	4.6 Руйнування підземної інфраструктури
	4.7 Руйнування помп та насосів, що відкачують воду
5. Безпека	5.1 Безпека комунікацій та трубопроводів
	5.2 Штрафування за порушення мір безпеки
	5.3 Занадто повільна система реакції на небезпеку
	5.4 Критичний рівень відводу стічних вод
	5.5 Інвестування у безпеку міста
	5.6 Безпечні підземні роботи з підземного будування
	5.7 Загальний рейтинг безпеки
	5.8 Спеціалісти з підземної безпеки
	5.9 Сповіщення про небезпеку
6. Повінь	6.1 Проєкти попередження повеней
	6.2 Пагубна дія погоди/штормів
	6.3 Розмиття доріг
	6.4 Система керування повінню
	6.5 Переповнення каналізацій стоковими водами
	6.6 Затоплення тунелів
	6.7 Затоплення доріг
	6.8 Падіння дерев
	6.9 Руйнування електричних систем насосів
	6.10 Закони щодо встановлення дренажних систем
7. Підземний	7.1 Підземна утилітарна інфраструктура
	7.2 Підземні кілометрові паркінги
	7.3 Безпека підземного функціонування
	7.4 Експерти з проблем підземної інфраструктури
	7.5 Потужна підземна насосна станція
	7.6 Розширення підземних транспортних доріг/тунелей
	7.7 Підземні кабелі
	7.8 Прорив труб під землею
	7.9 Штрафування за пошкодження підземної інфраструктури
	7.10 Вплив розвитку підземної інфраструктури на місто

Графи знань на прикладі концептів «Тунель», «Підземний» показані на рис. 2.27, 2.28 відповідно.

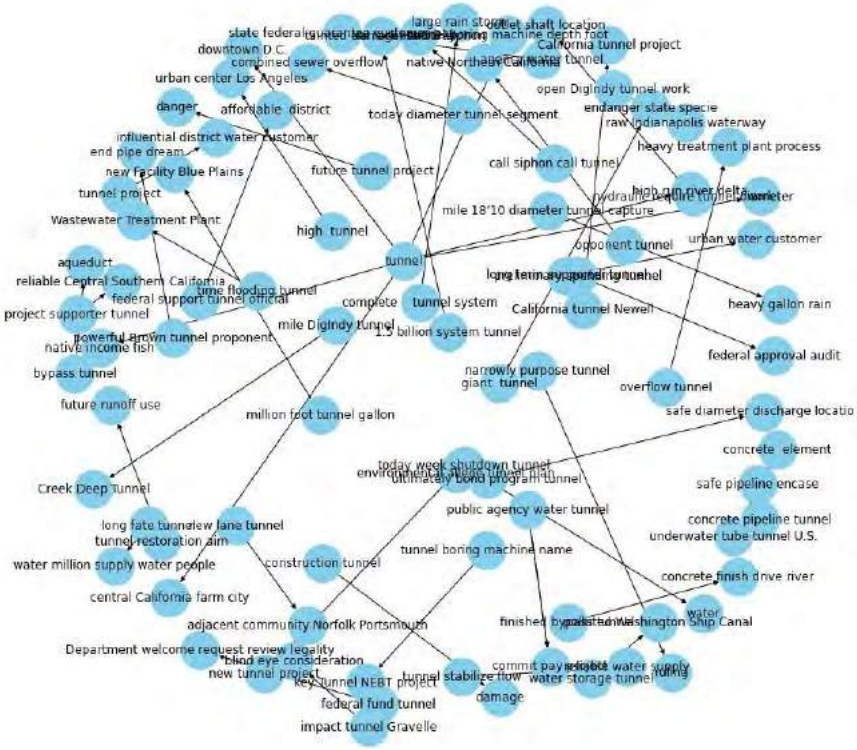


Рисунок 2.27 – Граф знань за концептом «Тунель»

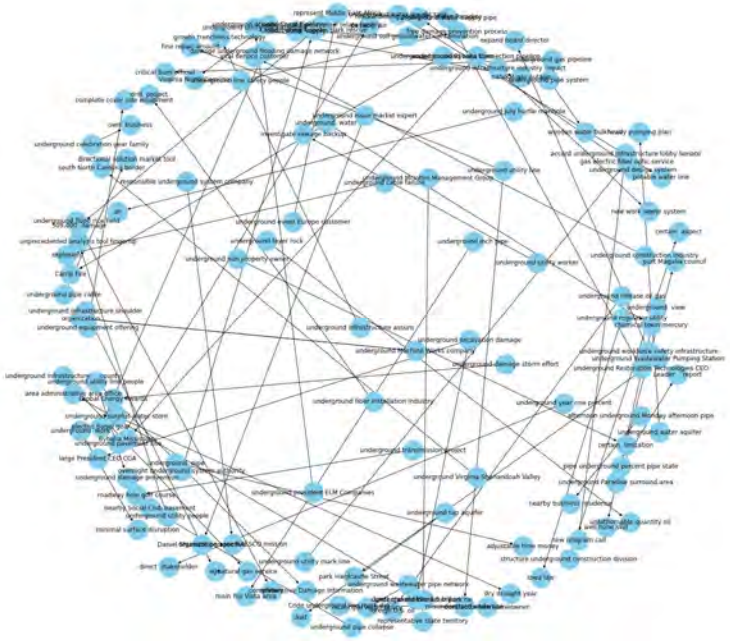


Рисунок 2.28 – Граф знань за концептом «Підземний»

Класифікація інформації. Інформаційні одиниці на вході впорядковуються за класами, які сформовані вручну. Було створено правила класифікації на базі концептів, що було виділено з англомовних (та перекладено) та україномовних джерел. Початкова класифікація складала 15 класів. Концепти видобуто за допомогою бібліотеки python gensim [53]. Для класифікації застосовано підхід на правилах та протестовано перспективні підходи класифікації на базі нейронних мереж, для яких можна застосовувати вже виділені класи для навчання.

В табл. 2.10 наведено 15 класів для класифікації інформаційних одиниць.

Таблиця 2.10 – Класифікація інформаційних одиниць

1. Надзвичайна подія	1.1 Пожежа	1.2 Вибух	1.3 Повінь	1.4 Зсув
	1.5 Теракт	1.6 Зношення	1.7 Екологічна аварія	1.8 Забруднення
2. Тип події	2.1 Руйнування	2.2 Затоплення	2.3 Відмова функціонування	2.4 Жертви
3. Місце події	3.1 Наземний транспорт	3.2 Підземний транспорт	3.3 Водний транспорт	
	3.4 Офісна будівля	3.5 Промисловий об’єкт	3.6 Житлова будівля	
	3.7 Торговий центр	3.8 Підземна інфраструктура	3.9 Дорожня інфраструктура	
4. Тип підземної інфраструктури	4.1 Дюкер	4.2 Тунель	4.3 Паркінг	
	4.4 Дорога	4.5 Тротуар	4.6 Приміщення	
	4.7 Кабель	4.8 Трубопровід (4.8.1 водний, 4.8.2 газовий)	4.9 Підземний перехід	
5. Небажана подія	5.1 ДТП	5.2 Пробка	5.3 Яма	5.4 Дорожні роботи	5.5 Підтоплення
6. Тип загрози	6.1 Економічна загроза	6.2 Екологічна загроза	6.3 Загроза життю	6.4 Загроза руйнування
	6.5 Загроза вибуху	6.6 Загроза пожежі	6.7 Загроза затоплення	
7. Причини загрози	7.1 Економічна загроза	7.2 Екологічна загроза	7.3 Загроза життю	7.4 Загроза руйнування
	7.5 Загроза вибуху	7.6 Загроза пожежі	7.7 Загроза затоплення	
8. Наслідки загрози	8.1 Економічна загроза	8.2 Екологічна загроза	8.3 Загроза життю	8.4 Загроза руйнування
	8.5 Загроза вибуху	8.6 Загроза пожежі	8.7 Загроза затоплення	
9. Типи заходів	9.1 Економічні заходи	9.2 Екологічні заходи	9.3 Укріплення	
	9.4 Дублювання	9.5 Заходи посилення безпеки	9.6 Створення нових об’єктів	
10. Географічна назва				
11. Екотранспорт	11.1 Велотранспорт	11.2 Електротранспорт	11.3 Зарядна станція	
12. Еко-об’єкт	12.1 Алея	12.2 Парк	12.3 Водойма	
	12.4 Місця відпочинку	12.5 Ріка	12.6 Рекреаційна зона	
13. Засоби контролю та попередження	13.1 Моніторинг	13.2 Інспекції	13.3 Штрафування	13.4 Відеонагляд
	13.5 Інформаційні системи моніторингу	13.6 Звіти	13.7 Аеронагляд	
14. Безпека	14.1 Засоби безпеки	14.2 Споруди безпеки	14.3 Попереджувальні заходи	
	14.4 Евакуація	14.5 Транспортна безпека		
15. Забезпечення підземної інфраструктури	15.1 Технічне забезпечення	15.2 Дублюючі системи	15.3 Експерти з підземного будівництва	
	15.4 Інженери з експлуатації підземних споруд	15.5 Інноваційні проекти та дослідження		

Таким чином, документи, що було адаптовано та перекладено до бази знань, було класифіковано за первинними 15 класами у складі класифікатора, що розроблюється. Результати передаються до інших методів якісного аналізу для використання під час обчислень.

2.6 Когнітивне моделювання підземного будівництва

Наведемо когнітивне моделювання підземного будівництва на основі наведеного у розділі 1.1 системного підходу до моделювання і сценарного аналізу планування розвитку інфраструктури мегаполісу в умовах екологічних, техногенних і терористичних загроз, що базується на спільному застосуванні методологій передбачення, когнітивного моделювання та фрактального аналізу.

Назвемо досліджувану складну систему "Природно-технічна геосистема".

Перший крок. Розробка когнітивної моделі. У таблиці 2.10 представлені дані про вершини (концепти) ієрархічної когнітивної моделі без прив'язки до конкретної території, в узагальненому вигляді. Використовуються узагальнюючі поняття (показники, чинники), які від конкретики, які можна розкрити і враховані надалі розробки нижніх рівнів ієрархічної моделі. На рис. 2.29 представлена ієрархічна когнітивна карта I_G : "Природно-технічна геосистема". У таблиці 2.11 і рисунку 2.29 вершини верхнього (першого рівня) позначені як $I - V_i, i = 5, 11, 13, 15, 16$. У таблиці 2.10 у графі "призначення вершин" позначені вершини, що відіграють роль виділені різні ролі в когнітивній системі.

Когнітивна модель – це імітаційна модель, яка дозволяє не проводити експеримент над "живою" системою, а імітувати її поведінку та можливий майбутній розвиток під впливом різних факторів, генеруючи нові знання про систему. Це дозволяє обґрунтувати управлінські рішення у тій чи іншій ситуації.

Таблиця 2.11 – Вершини ієрархічної когнітивної карти "Природно-технічна геосистема"

Код	Опис вершини	Призначення вершини
$I - V_{11}$	Життєздатність підземного міського розвитку	Орієнтовний
$I - V_{13}$	Катастрофи, екстремальні та надзвичайні ситуації	Збурюючий
$I - V_{15}$	Екологічні ризики	Збурюючий
$I - V_{16}$	Економічні ризики	Збурюючий
$I - V_5$	Генетичний тип та літологічний склад грунтів	Основний
V_1	Гірський та гідростатичний тиск, сейсмічне вплив	Основний
V_2	Поверхневе навантаження Індекс статичного навантаження	Основний
V_3	Показник статичного навантаження навколишнього ґрунтового масиву	Основний
V_4	Існуючі підземні споруди	Турбуючий
V_6	Розрахунковий опір ґрунту	Основний
V_7	Водоносні горизонти та висока вода	Турбуючий
V_8	Тип рельєфу та морфометрія	Основний
V_9	Інженерно-геологічні процеси	Турбуючий
V_{10}	Технології гірничого будівництва	Регулювання
V_{12}	Рівень комфортності праці та відпочинку при будівництві та експлуатації підземних споруд	Орієнтовний
V_{14}	Будівельні, експлуатаційні, управлінські ризики	Турбуючий
V_{17}	Кваліфікація персоналу	Регулювання
V_{18}	Промислова безпека	Основний
V_{19}	Якість та терміни будівництва	Регулювання

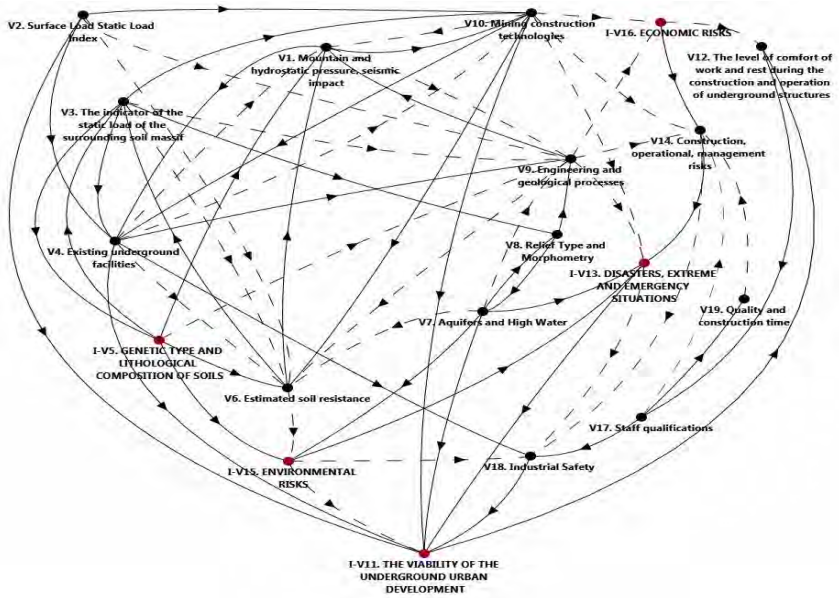


Рисунок 2.29 – Ієрархічна когнітивна карта I_G "Природно-технічна геосистема"

Другий крок моделювання. Перш ніж використовувати когнітивну модель визначення її можливого поведінки, другою етапі моделювання аналізуються різні властивості моделі. У разі необхідно проаналізувати властивості стійкості моделі.

Результати аналізу властивостей моделі одержано за допомогою програмного комплексу CMLS [30]. На рисунках 2.30 та 2.31 показаний приклад визначення циклів когнітивної моделі I_G.

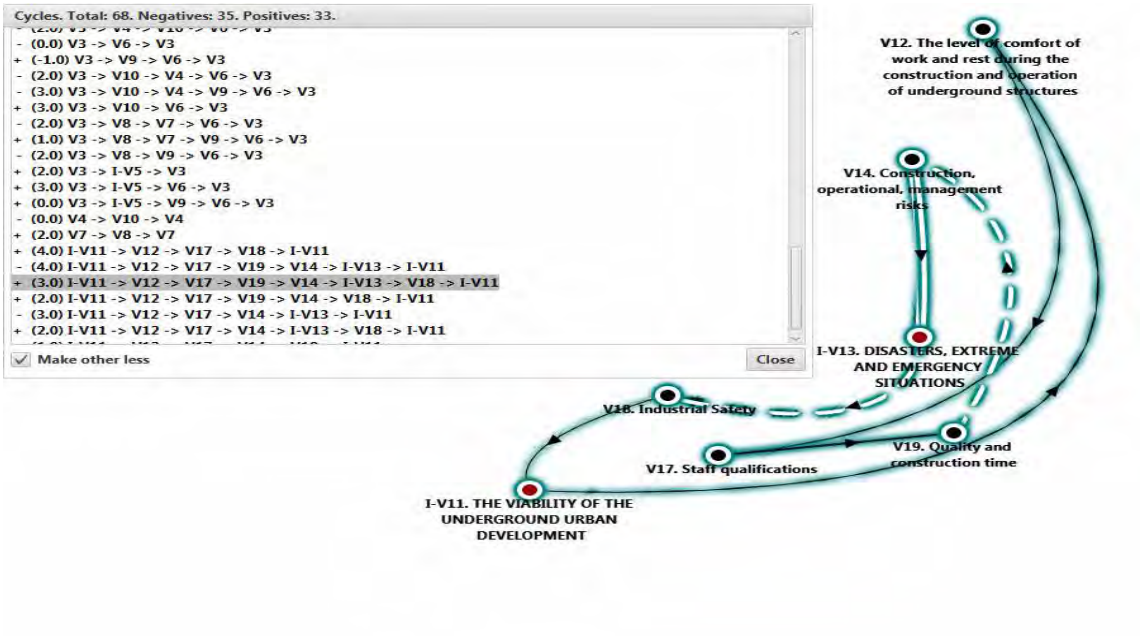


Рисунок 2.30 – Цикли когнітивної карти (виокремлено один позитивний цикл)

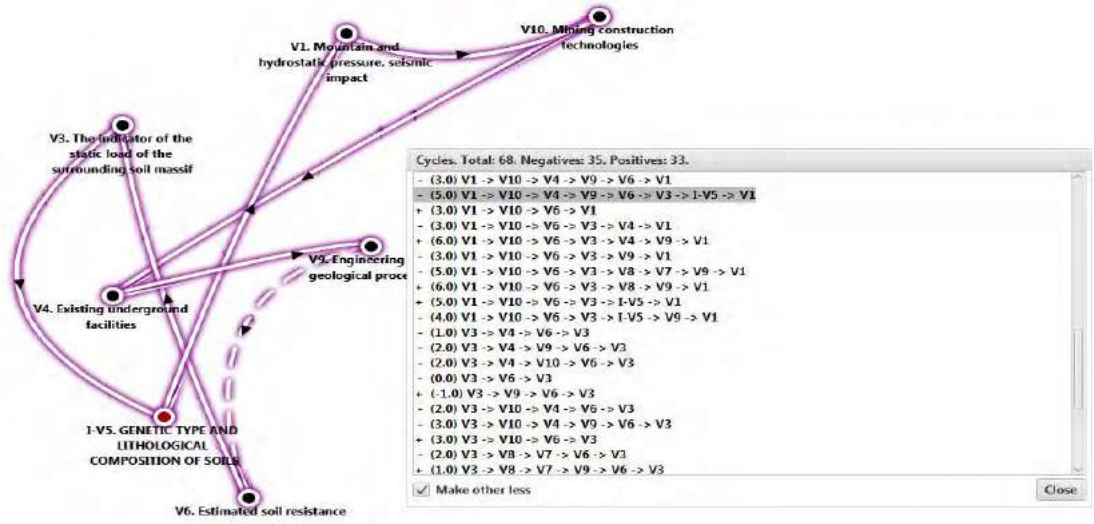


Рисунок 2.31 – Цикли когнітивної карти (виокремлено один негативний цикл)

На рисунку 2.30 показаний один із циклів позитивного зворотного зв'язку, ознакою якого є парна кількість негативних дуг у ньому.

Стійкість до збурень. Когнітивна модель I_G виявилася нестійкою до збурень згідно з прийнятим критерієм [56]: максимальний за модулем M корінь характеристичного рівняння матриці відносин графа I_G ($|M| = 1{,}82 > 1$) має бути менше 1.

Структурна стабільність. Аналіз співвідношення кількості стабілізуючих циклів (35 негативних зворотних зв'язків) та циклів-прискорювачів процесу (33 позитивні зворотні зв'язки) свідчить про структурну стійкість такої системи [56].

Наведений приклад аналізу циклів когнітивної моделі показав різноманіття циклів причинно-наслідкових зв'язків, що у складних системах. В аналізованій системі їх 68. Без відповідного теоретичного аналізу великий ризик впливу людського фактора при прийнятті управлінських рішень, тому що його наслідки можуть бути неочевидними через складність взаємодій у системі.

Аналіз зв'язності системи, симпліційний аналіз. Занурюючись у вивчення структури когнітивної моделі, бажано провести симпліційний аналіз властивостей її зв'язності. Такий аналіз проводиться з метою вивчення та розуміння топологічних властивостей моделі та, відповідно, інших граней зв'язності досліджуваної складної системи, які не виявляються у наведеному вище аналізі алгебри. На думку Р.Х. Аткіна та Дж. Касті, зв'язність є суттю поняття великої системи [56, 59].

Властивості зв'язності блоків (симплексів) характеризують "глибинні" зв'язки когнітивної моделі, зв'язки її симплексів, а не тільки вершин, як у когнітивній карті. Симплекс утворюється кожною вершиною, що є причиною того, що деякі інші вершини взаємодіють один з одним. На рисунках 2.32–2.34 представлені результати симплексного аналізу моделі I_G. На рисунку 2.32 представлена перетворена матриця суміжності графа I_G із (y) зазначеними в ній у

порядку зменшення розмірностями ρ симплексів $\sigma_{rho}^{V_i}$ рядків і (x) стовпців; $\rho = k - 1$ – це кількість елементів у відповідному рядку/стовпці, розмірність симплексу показує кількість ребер, що з'єднують вершини. На рисунку 2.32 у симплексі $\sigma_{\rho=3}^{(V_{(10)})}$ ($\rho = 3$ означає, що з кожної вершини виходять три ребра) виділено одну вершину V_{10}. Ця вершина V_{10} є причиною з'єднання вершин V_1, V_2, V_3, V_4. Ця вершина (Технології гірничого будівництва - V_{10}) є причиною того, що вершини Гірський і гідростатичний тиск , Сейсмічне вплив (V_1), Індекс статичного навантаження на поверхню (V_2), Показник статичного навантаження навколишнього ґрунтового масиву (V_3), Існуючі підземні споруди (V_4), що утворюють один блок , зв'язані між собою.

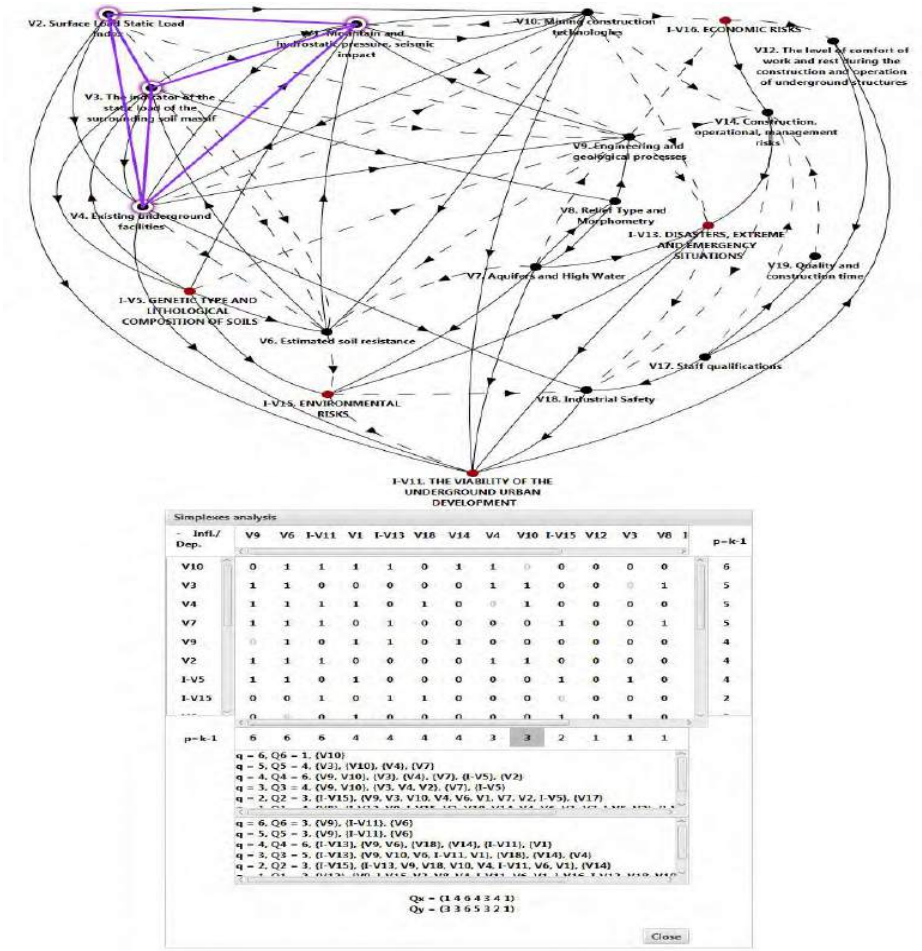


Рисунок 2.32 – Результати симплексного аналізу (розрахунок)

Таким чином, ці вершини є причиною симплексу у формі тетраедра.

Зверніть увагу, що симплекси вищої розмірності не зображуються на поверхні; умовно можна побудувати лише їхню "проекцію" – рисунок 2.33.

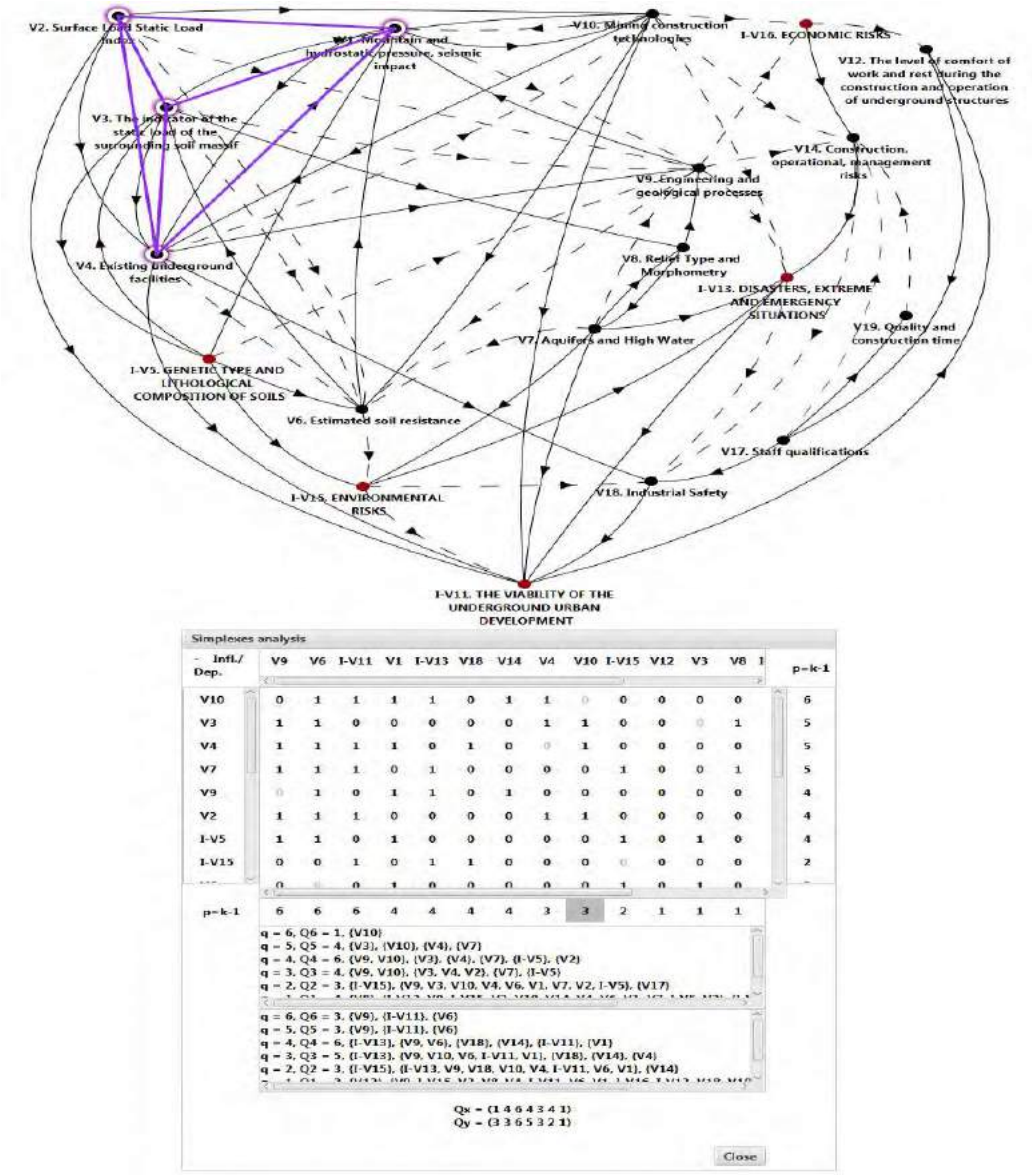


Рисунок 2.33 – Зображення одного з простих елементів розмірності $\rho = 3$

Симплекси утворюють зв'язні ланцюжки $q = 1$ (зв'язок через вершину), $q = 2$ (зв'язок через ребро), $q = 3$ (зв'язок через площину) і т.д., об'єднуючись таким чином у симпліційні комплекси K_x (по рядках – "входах") і K_y (стовпцях – "виходах") . Симплекси q – пов'язані або не пов'язані в симплекси (у них відсутні або є зв'язки симплексів по вершинах, ребрах, площин, m-мірних обсягів).

Симпліційні комплекси характеризуються структурними векторами Q_x та Q_y утворені групами вершин, загальними для різних симплексів.

Третій етап моделювання. Сценарний аналіз призначений для передбачення можливих тенденцій розвитку ситуацій на моделі. Для створення сценаріїв розвитку системи впливу вводяться у вершини когнітивної карти у вигляді набору імпульсів.

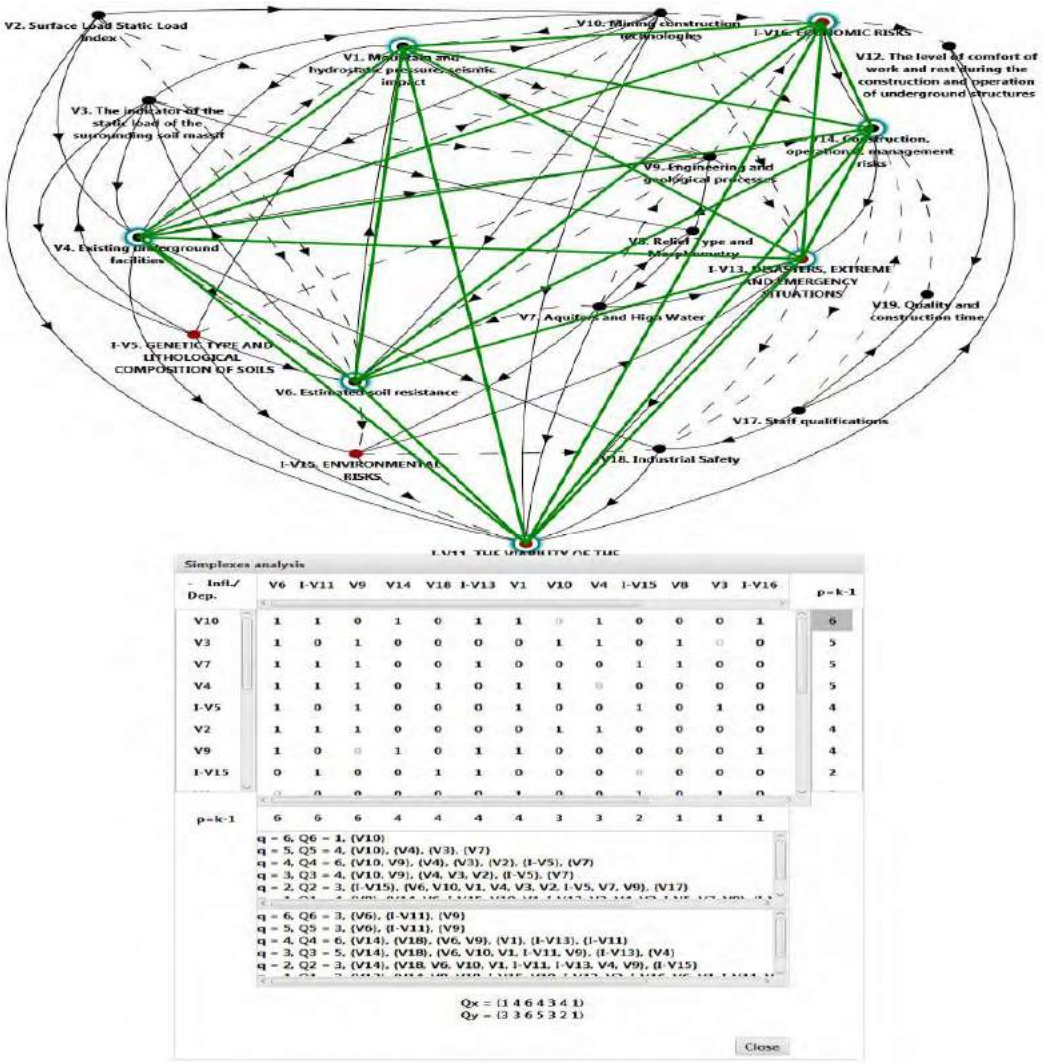


Рисунок 2.34 – Зображення проекції одного з симплексів розмірності $\rho = 6$

Можливе введення збурень Q різних розмірів (нормованих) у будь-яку з вершин, а також їх комбінацію. У зв'язку з великою кількістю теоретично можливих варіантів збурень, що вводяться, перед винятком імпульсного

моделювання необхідно розробити план обчислювального експерименту, виключивши хоча б практично неможливі варіанти.

Вносячи збурення у вершини, особа, яка приймає рішення, шукає у відповідь питання: " Що станеться, якщо ...? ".

Програмний комплекс CMLS [94] дозволяє в процесі імпульсного моделювання та аналізу отриманих результатів вводити керуючі або збурюючі на будь-якому етапі моделювання. Це дозволяє змінювати (коригувати) сценарії в динаміці моделі, визначати ефекти, що наближають процеси до бажаних.

Наведено результати моделювання імпульсів у чотирьох сценаріях.

Сценарій №1. Припустимо, що для будівництва метро використовується хороша технологія. У вершину V_{10} вводиться управляюча дія $q_{10} = +1$, вектор збурення $Q = \{q_1 = 0, \dots, q_{10} = +1, \dots, q_{19} = 0\}$.

На рис. 2.35 представлені графіки імпульсних процесів. Для зручності візуального аналізу зображення, графіки імпульсних процесів у вершинах $V_{10}, I - V_{13}, I - V_{15}, I - V_{16}, I - V_{11}, I - V_5$ представлені двома рисунками: рис. 2.35а – з першого по шостий крок моделювання та рис. 2.35б – з шостого по десятий крок моделювання. Зображення імпульсних процесів за більшої кількості кроків моделювання перестав бути необхідним, оскільки тенденції поведінки системи за умов вже очевидні.

Моделюючи сценарій № 1, доцільно проаналізувати, чи можуть зміни у технологіях Гірського будівництва (V_{10}) та як вплинути на інші вершини когнітивної моделі. Як видно з графіків на рис. 2.35, позитивні зміни V_{10} можуть сприяти позитивним тенденціям у розвитку вершин на верхньому ієрархічному рівні: аж до 5-го і 6-го кроків моделювання посилюються тенденції зниження лиха, екстремальні та надзвичайні ситуації ($I - V_{13}$), екологічні ризики ($I - V_{15}$), Економічні ризики ($I - V_{16}$), Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів ($I - V_5$), Життєздатність підземної міської забудови ($I - V_{11}$).

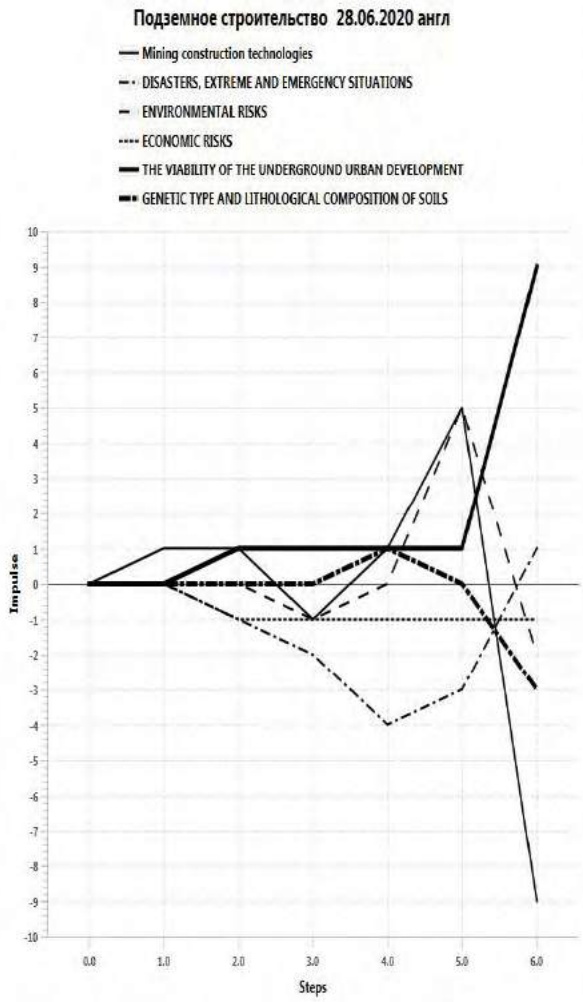


Рисунок 2.35а – Графіки імпульсних процесів з першого по шостий крок моделювання

Сценарій №1

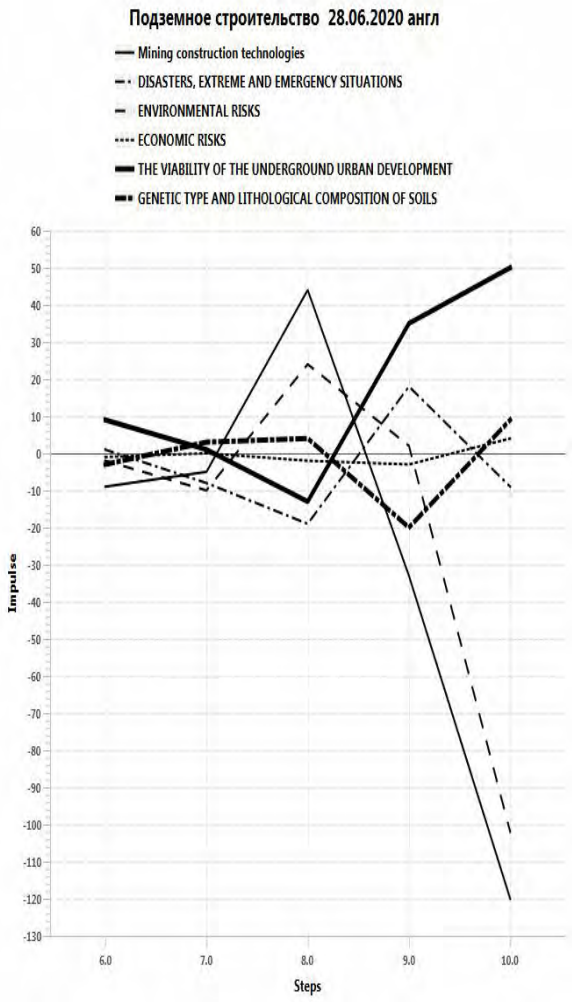


Рисунок 2.35б – Графіки імпульсних процесів з шостого по десятий крок моделювання

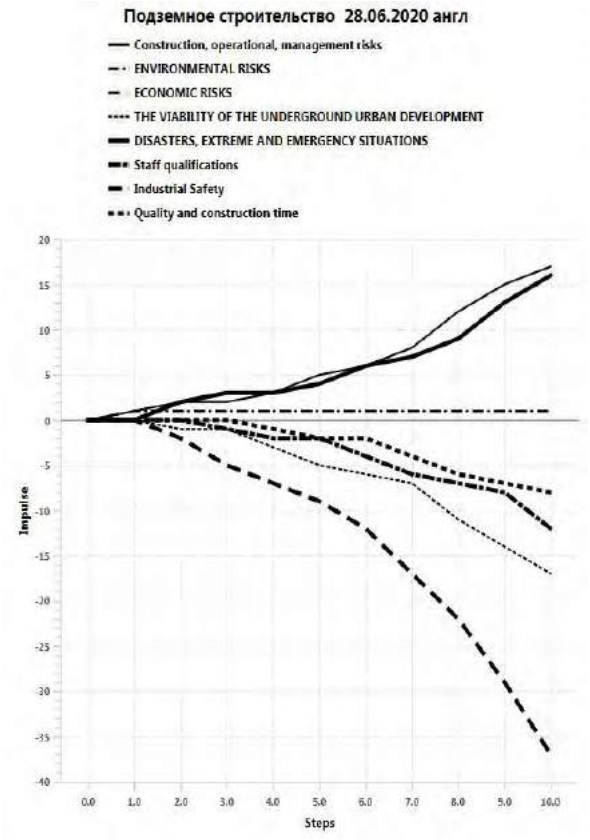
Сценарій №1

Все це може свідчити про те, що однієї позитивної зміни в одній з вершин системної моделі може бути недостатньо, щоб унеможливити негативний вплив ризиків та інших негативних впливів.

Сценарій №2. Припустимо, що у системі зростає можливість одночасного виникнення всіх ризиків. З'являються ефекти, що збурюють

$q_{14} = +1, q_{15} = +1, q_{16} = +1$, існує вектор збурень $Q = \{q_1 = 0, \dots, q_{14} = +1, q_{15} = +1, q_{16} = +1, \dots, q_{19} = 0\}$.

Результати імпульсного моделювання представлені на рисунку 2.36а для вершин $V_{14}, I - V_{15}, I - V_{16}, I - V_{11}, I - V_{13}, V_{17}, V_{18}, V_{19}$ і на рисунку 2.36б для вершин $V_{12}, V_{17}, V_{18}, V_{19}, V_{10}$.



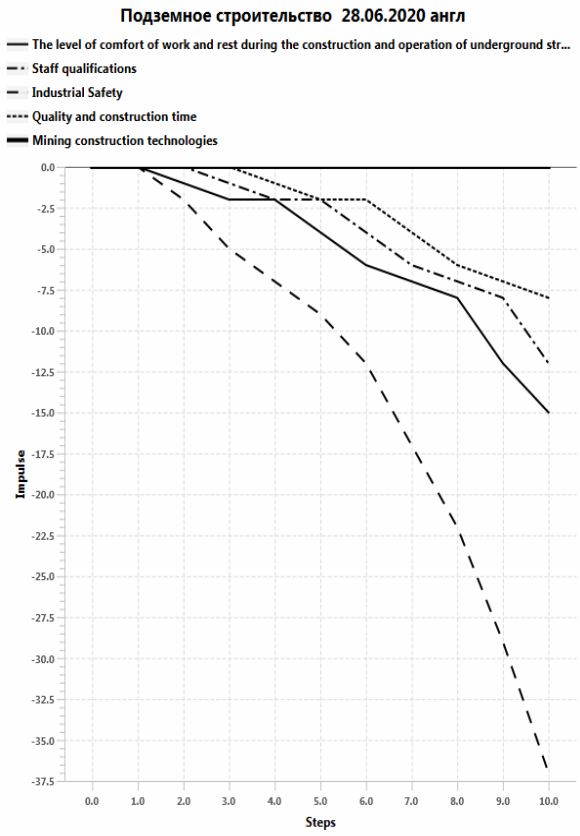


Рисунок 2.36а – Графіки імпульсних процесів. Сценарій №2

Рисунок 2.36б – Графіки імпульсних процесів. Сценарій №2

Результати моделювання другого сценарію показують вкрай несприятливий варіант розвитку ситуацій у системі. Зі збільшенням ризиків, всі показники системи падають як на першому, так і на другому рівнях ієрархії. Це спостереження змушує приймати рішення про пошук необхідної протидії ситуаціям, що виникли.

Розглянемо третій сценарій. Припустимо, що покращуються інженерно-геологічні процеси (V_9), технології гірничого будівництва (V_{10}), кваліфікація персоналу (V_{17}), якість та терміни будівництва (V_{19}), але відбуваються Катастрофи, екстремальні та надзвичайні ситуації ($I - V_{13}$).

Сценарій №3. Керуючі впливи $q_9 = +1, q_{10} = +1, q_{17} = +1, q_{19} = +1, q_{13} = +1$, вектор збурень $Q = \{q_1 = 0, \dots, q_9 = +1, q_{10} = +1, \dots, q_{13} = +1, \dots, q_{17} = +1, \dots, q_{19} = +1\}$.

Результати імпульсного моделювання представлені на рисунках 2.37а для вершин $I - V_{13}, V_9, V_{10}, V_{19}, I - V_{15}, I - V_{16}, V_{17}, V_{18}, I - V_{11}$ і 2.37б для вершин $V_{17}, V_{18}, V_{19}, I - V_{11}, V_{12}, V_{14}, I - V_{13}$.

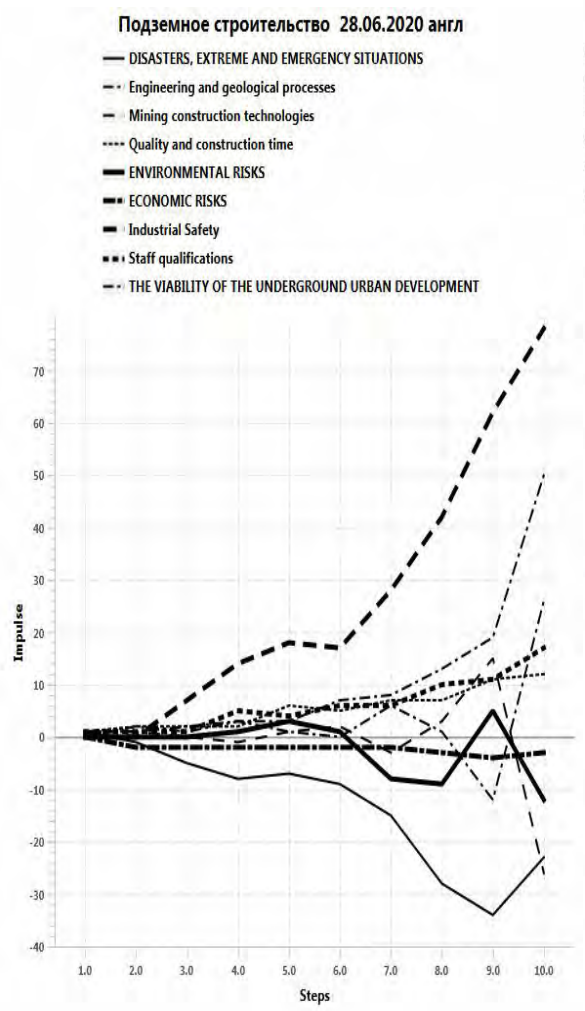


Рисунок 2.37а – Графіки імпульсних процесів. Сценарій №3

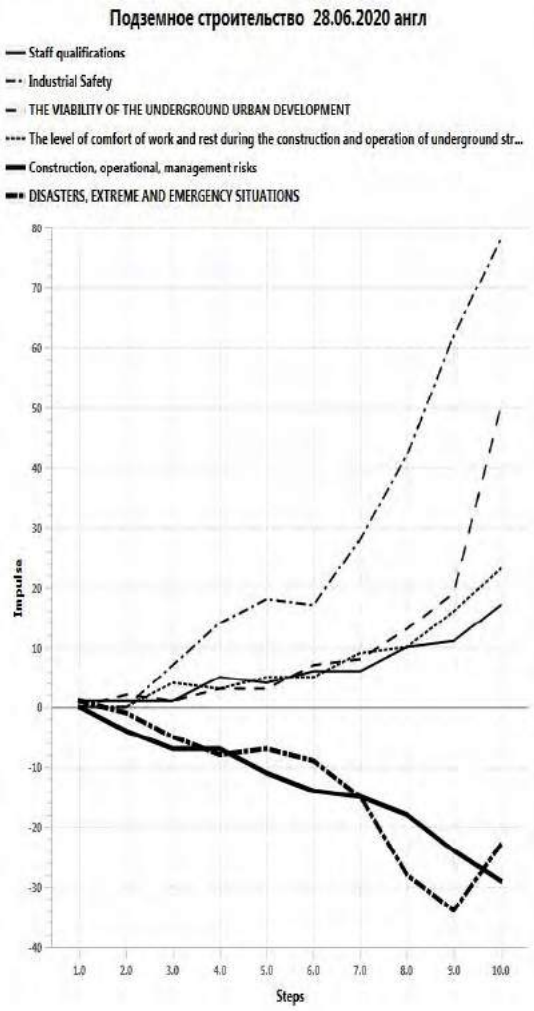


Рисунок 2.37б – Графіки імпульсних процесів. Сценарій №3

Аналіз результатів імпульсного моделювання за сценарієм №3 показує, що впровадження керуючих впливів у вершини Інженерно-геологічні процеси (V_9), Технології гірничого будівництва (V_{10}), Кваліфікація персоналу (V_{17}), Якість та терміни будівництва (V_{19}), Але є Катастрофи, екстремальні та надзвичайні ситуації ($I - V_{13}$) дозволяє протидіяти негативному впливу можливих катастроф та екстремальних ситуацій, знизити вплив економічних, екологічних та технологічних ризиків. Таким чином, сценарій №3 можна вважати сприятливим: промислова безпека підвищується.

Наведено результати моделювання ще одного сценарію №4. Передбачається, що будівельні, операційні, управлінські ризики можуть бути знижені. У цьому випадку імпульсні дії ініціюють 6 вершин моделі та досліджується синергетичний ефект від їхньої спільної дії. Моделювання цього сценарію розвитку ситуацій на моделі проводиться для того, щоб визначити, необхідно чи ні посилити вплив на систему для досягнення добрих показників.

Сценарій № 4. Керуючі дії $q_9 = +1, q_{10} = +1, q_{17} = +1, q_{19} = +1, q_{13} = +1, q_{14} = -1$, вектор збурень $Q = \{q_1 = 0, \dots, q_9 = +1, q_{10} = +1, \dots, q_{13} = +1, q_{14} = -1, \dots, q_{17} = +1, \dots, q_{19} = +1\}$.

Результати імпульсного моделювання представлені на рис. 2.38а для вершин $I - V_{13}, V_9, V_{10}, V_{14}, V_{17}, V_{19}$ і рисунок 2.38б для вершин $V_{12}, V_{14}, V_{15}, V_{16}, V_{18}, I - V_{11}$.

Аналіз результатів моделювання Сценарію №4, який відрізняється від сценарію №3 додаванням імпульсу $q_{14} = -1$, що моделює можливість зниження Будівельних, операційних, управлінських ризиків показав наступне. Сукупна позитивна дія шести факторів на систему призводить до можливості появи бажаних тенденцій у всій системі. Так, спостерігаються тенденції покращення (зростання) життєздатності підземного містобудування, рівня комфорту, праці та відпочинку при будівництві та експлуатації підземних споруд, Промислової безпеки при зниженні всіх видів ризику та зменшенні Катастроф, екстремальних та надзвичайних ситуацій.

Порівняємо результати моделювання сценаріїв №1, №2, №3 та №4, використовуючи можливості програмного комплексу CMLS. Результати імпульсного моделювання на 10-му кроці моделювання обрані та представлені у вигляді гістограм на рисунку 2.39. Як видно з рисунка 2.39, сценарій №4 можна вважати кращим із розглянутих, хоча його результати не надто відрізняються від результатів сценарію №3. Якщо поставити завдання мінімізації витрат ресурсів для реалізації конкретного сценарію, то, можливо, найкращим буде сценарій №3, за якого у системі буде менше керуючих впливів.

Порівняння результатів сценаріїв №3 і №4 з результатами сценарію №1, в якому керуюча дія застосовується тільки до однієї вершини, показує, що він поступається сценарієм №3 та №4. Так, наприклад, значення імпульсу у вершині промислової безпеки (V_{10}) досягає 30, а за сценарієм №3 значення імпульсу в цій вершині дорівнює 78, а за сценарієм №4 значення імпульсу дорівнює 85. Якщо порівняти результати моделювання сценарію №2 з результатами інших сценаріїв, то очевидно, що без протидії можливим ризикам сценарії розвитку природно-технічної геосистеми будуть надто песимістичні.

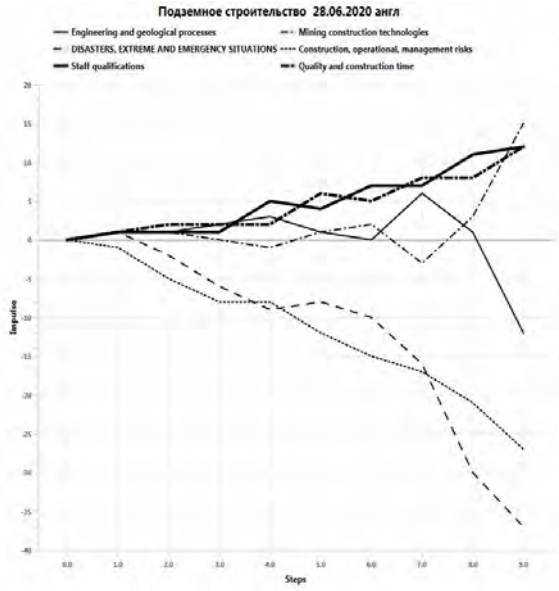


Рисунок 2.38а – Графіки імпульсних процесів. Сценарій №4

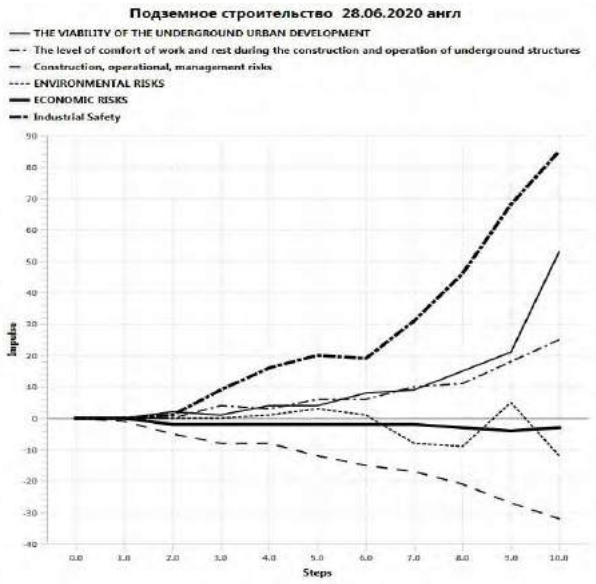
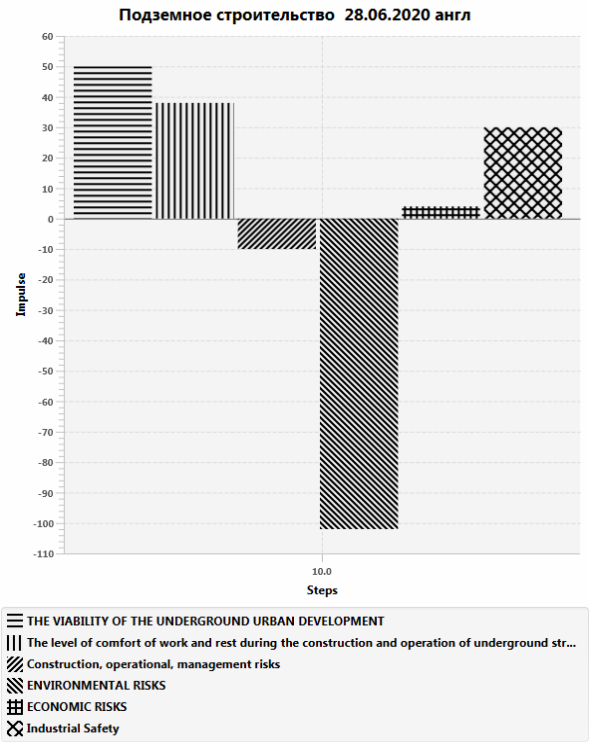
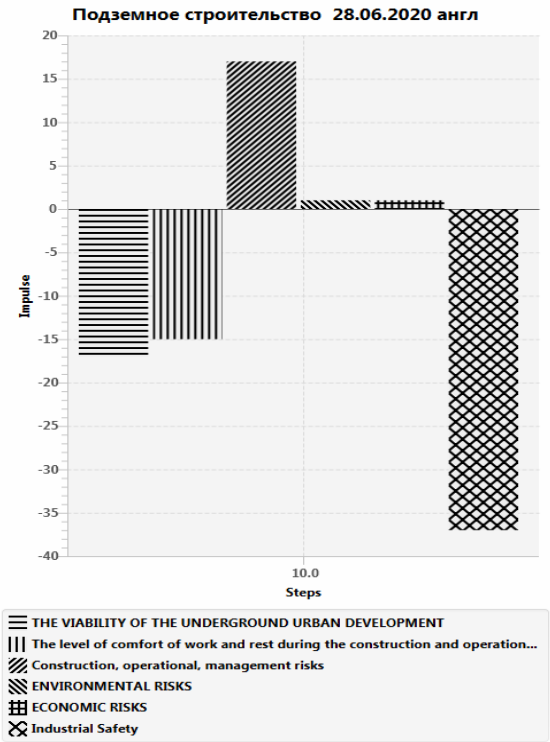


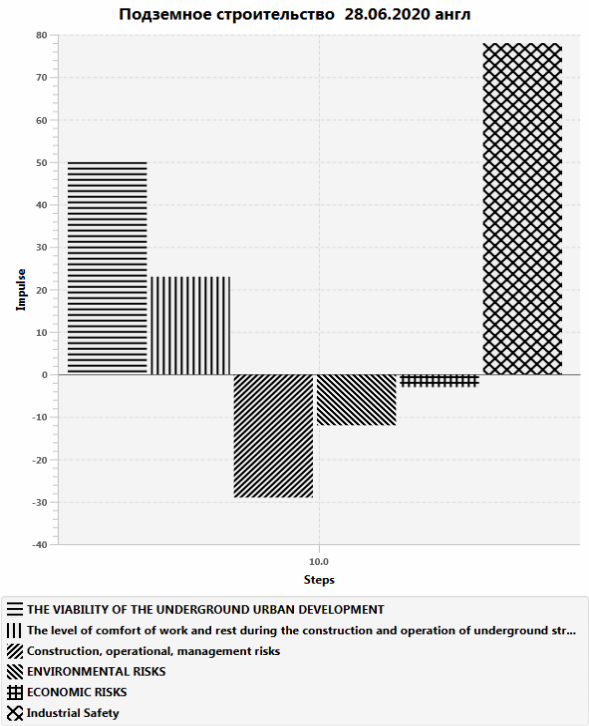
Рисунок 2.38б – Графіки імпульсних процесів. Сценарій №4



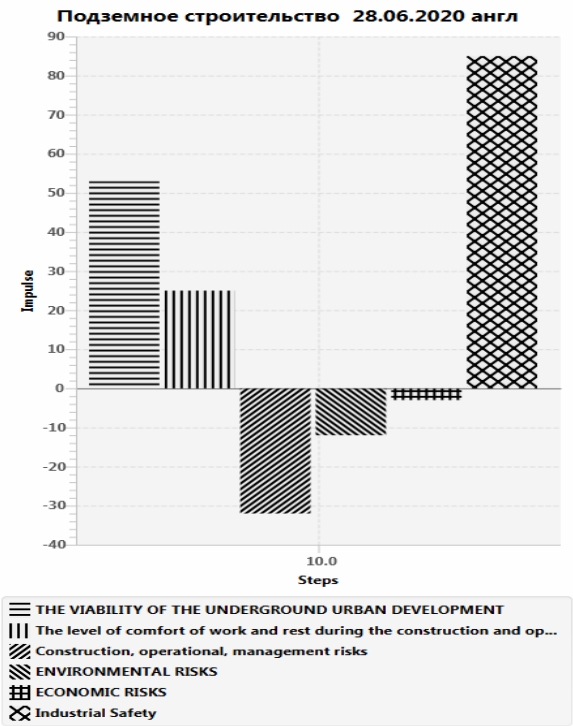
а) сценарій №1



б) сценарій №2



в) сценарій №3



г) сценарій №4

Рисунок 2.39 – Гістограми значень імпульсів на 10-му кроці моделювання за сценаріями №1–4

Моделювання сценаріїв можливих процесів розвитку подій в аналізованій складній системі здійснюється під впливом різних внутрішніх та зовнішніх збурень та керуючих імпульсних впливів. Результати проведеного когнітивного моделювання дозволяють судити про те, що когнітивні моделі, що систематизують і структурують різну інформацію про систему підземного будівництва, відповідають реальній системі і можуть бути використані для передбачення можливих процесів розвитку ситуацій у системі під впливом різних факторів, що збурюють і керують. Розроблений авторський програмний комплекс CMLS дозволяє в процесі імпульсного моделювання та аналізу отриманих результатів вводити керуючі або збудливі на будь-якому етапі моделювання. Це дозволяє змінювати (коригувати) сценарії у динаміці створення моделі, визначати ефекти, що наближають процеси до бажаних. Розроблена методологія та інструментарій дозволили поєднати оцінку впливів та взаємозв'язків геологічних факторів, техногенних та структурно-функціональних типів для дослідження будівництва підземних об'єктів.

Запропонований системний підхід до дослідження розвитку підземних об'єктів на основі синтезу методологій когнітивного моделювання та форсайту може стати науково-методичною основою для розвитку науки "Будівельна геотехнологія" та її практичного застосування для вивчення проблем підземного будівництва з метою забезпечення безпеки та якості життя людини. Розроблений системний підхід застосовується до дослідження об'єктів підземного будівництва з метою вибору обґрунтованих сценаріїв майбутнього розвитку.

2.8 Системні стратегії використання підземного простору (на прикладі міста Києва)

Світова практика містобудування свідчить, що одним з найбільш ефективних шляхів вирішення екологічних і безпекових проблем мегаполісів є

розвиток підземної урбаністики, тобто розміщення в підземному просторі міста численних споруд господарчого, комунального й транспортного призначення. При цьому системну відповідність повинні отримати функціонально-структурна, інженерно-геологічна й геобудівельна складові урбаністичного розвитку.

У зв'язку з цим виникає нагальна потреба у створенні стратегічного майстер-плану освоєння підземного простору міста Києва (до 2040 р.) і більш конкретних планів ближчої перспективи. Успіх будь-якої містобудівної моделі сучасного мегаполісу залежить від спроможності відповідати різноманітним укладам життя, потребам населення та особливостям бачення населенням майбутнього свого міста, що повинно знайти відображення в філософії майстер плану сталого розвитку. Він мусить забезпечити стратегію, яка на узагальненому рівні розкриє можливі сценарії розвитку підземної урбаністики у відповідності з планами розвитку міста на найближчі десятиріччя, а також визначить пріоритетні території для конкретних дій і задасть необхідні параметри для швидкого й екологічного освоєння цих територій. Майстер-план не є жорсткою програмою, а являє собою набір стратегій, принципів і концептів, які допоможуть управлінню розвитком міста, забезпечать привабливі пропозиції інвесторам, відкриють нові можливості суспільним організаціям та науково-освітній спільноті впливати на містобудівну політику. Побудова стратегічного майстер-плану повинна спиратися на розглянутий в попередніх розділах системний підхід до розвитку підземної урбаністики, а також творчо використовувати попередні напрацювання планових рішень.

Справжнім структурним «каркасом», що охоплює область зосередження найбільшої функціональної активності геоурбаністичної системи столиці є Київський метрополітен [95]. Його протяжність на сьогодні складає 69,6 км і охоплює 52 станції. Згідно Генерального плану розвитку м. Києва та його приміської зони до 2025 р. [96] схема розвитку метрополітену передбачає продовження трьох існуючих ліній і будівництво однієї нової, причому загальна

довжина ліній повинна досягти 141,4 км, кількість станцій 109, пересадочних вузлів між лініями метрополітену – 8 (рис. 2.40).

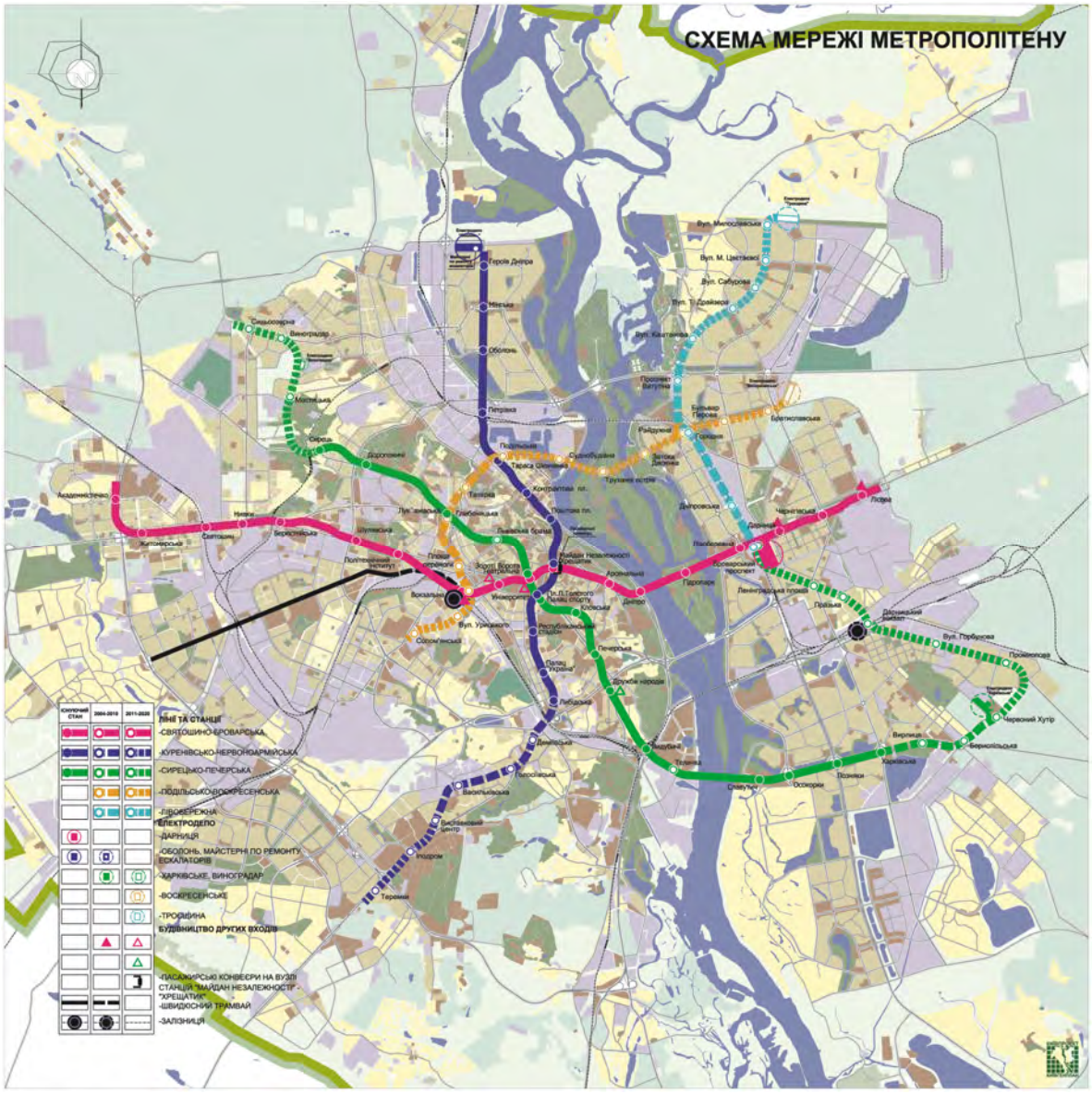


Рисунок 2.40 – Перспективний розвиток Київського метрополітену згідно з Генеральним планом розвитку Києва до 2025 р.

Київський метрополітен, особливо його станції, слід розглядати як споруди подвійного призначення й планувати використовувати у разі військових загроз як сховища цивільної безпеки. Високу надійність проти авіаційних і ракетних ударів можуть забезпечити станції глибокого закладання (31 станція), проте станції мілкого закладання (21 станція) можуть також слугувати сховищами для

широкого кола військових загроз. У разі необхідності підземний простір станцій і навіть прогінних тунелів (при зупиненні роботи метрополітену) можуть бути обладнані згідно правил облаштування сховищ цивільної безпеки й стаціонарно виконувати ці функції. За попередніми розрахунками відповідно облаштований Київський метрополітен може прийняти як сховище цивільної безпеки до 500 тис. осіб.

Серед перспективних напрямків розвитку Київського метрополітену залишається будівництво Лівобережної лінії, яка дозволить вирішити транспортну проблему для понад півмільйона мешканців Деснянського та Дніпровського районів. Лівобережна лінія пройде від житлового масиву Троєщина вздовж магістралі Троєщина – Осокорки до станції «Броварський проспект», за якою отримає розвиток у двох напрямках: повз Дарницьку площу до другого залізничного вокзалу та через масиви Позняки та Осокорки до майбутнього Олімпійського спортивного комплексу. Протяжність першої черги – 4,96 км. Ця ділянка від станції «Вулиця Милославська» до станції «Проспект Шухевича» буде проходити по надзаплавній терасі Дніпра, що характеризується відносно рівним рельєфом на всьому протязі. Вона складена осадовими відкладами, що мають незначні кути залягання. Ці ґрунти переважно представлені пісками та озерними суглинками, що характеризуються невисоким рівнем міцності. Загалом ділянка буде проходити у відносно рівномірному геологічному та геоморфологічному середовищі на всьому протязі.

Подільсько-Вигурівська лінія – також майбутня нова лінія Київського метрополітену, яка після закінчення будівництва матиме 18 станцій і близько 20 км довжини. Вона проляже від станції «Братиславська» по Подільському мостовому переходу, через центр міста до нових житлових районів південно-західної частини Києва – Жуляни, Гатне та Вишневе, матиме станції біля залізничного вокзалу «Київ-Пасажирський» і аеропорту «Київ», буде сприяти зручному зв’язку Деснянського й Дніпровського районів з Правобережжям. лінія

метрополітену, буде проходити по території підвищеної платоподібної рівнини, розчленованої ярами, балками та долинами невеликих річок.

Геологічний розріз на цій лінії метрополітену складають супіски, суглинки, глини, піски та леси. Витримані водоносні горизонти поширені в нижньо- і середньочетвертинних прісноводних суглинках і підморенних пісках, крім того, локально розвинені підземні води зустрічаються в зсувних і делювіально-зсувних нагромадженнях, лесових утворень, надморенних відкладах. Від станції метро «Вулиця Милославська» до станції «Проспект Шухевича» лінія буде проходити по відносно рівній терасі, але від станції «Глибочицька» до станції «Райдужна» лінія буде проходити в межах рельєфу, що розчленований ярами, та лесовими останцями.

Серед планів середньострокової перспективи також розглядається Вишгородсько-Дарницька лінія пройде від площі Шевченка до Дарницького залізничного вокзалу і зв'яже Мінський масив, Вітряні гори, Пріорку, Куренівку, Караваєві дачі, Чоколівку, Олександрівську слобідку й Позняки. Вона буде проходити по території платоподібної рівнини, розчленованої ярами, балками та долинами невеликих річок. Розріз по лінії слідування метрополітену свідчить про переважний склад супісків, суглинків, глин, пісків та лесів. Витримані водоносні горизонти поширені в нижньо- і середньочетвертинних прісноводних суглинках і підморенних пісках, крім того, локально розвинені підземні води зустрічаються в зсувних і делювіально-зсувних нагромадженнях лесових утворень і надморенних відкладах. На правому березі лінія буде проходити по розчленованому ярами рельєфу, але на другій половині пройде по відносно рівній терасі.

Будуть розвиватися і вже існуючі лінії метрополітену. Сирецько-Печерська лінія продовжиться на північний захід у бік житлового масиву Виноградар та на схід вздовж проспекту Бажана і вул. Бориспільської до станції «Дарницький вокзал». Буде також завершене будівництво станції «Львівська брама».

Оболонсько-Теремківська лінія набуває розвитку в південному напрямку до житлового масиву Чабани з відгалуженням на кільцеву дорогу. Заплановані три нові станції «Одеська», «Автовокзал «Теремки», «Вулиця Дмитра Луценка», сумарна протяжність – 3,7 км. На своєму протязі лінія буде проходити в межах ділянки із розчленованим рельєфом, що складена переважно супісками та суглинками. Зсувні і делювіальні відклади обводнені не суцільно, існуючі в них безнапірні або слабонапірні води зустрічаються на глибинах до 6 м. В межах будівництва нових станцій значних змін у геологічній будові не спостерігатиметься.

Святошинсько-Броварська лінія продовжується вздовж проспекта Палладіна до станції «Новобіличі», яка розміститься біля однойменного зупинного пункту залізниці. Обговорюються перспективи продовження цієї гілки метра до міста Ірпінь. Від станції метро «Академмістечко» лінія буде проходити в межах ділянки із досить розчленованим рельєфом, складеним переважно слабкими супісками та суглинками. Зсувні і делювіальні відклади обводнені не суцільно, існуючі в них безнапірні або слабонапірні води зустрічаються на глибинах до 6 м. У верхньочетвертинній лесовій товщі на ділянках, де вона підстилається моренними глинами, зустрічається верховодка. До м. Ірпінь не буде значних змін у геологічній та гідрогеологічній характеристиці середовища.

Крім того, планується будівництво другого виходу зі станцій «Вокзальна», «Університет» і «Дарниця», оскільки наразі єдиний вихід не справляється з пасажиропотоком через обмеженість корисного простору вестибюлів та передескалаторних залів для проходу пасажирів, що створює суттєві незручності в їх обслуговуванні. Завдяки другому виходу пропускна спроможність станцій збільшиться принаймні в 1,5–2 рази. Крім того планується будівництво додаткового пасажирського переходу між станціями «Театральна» та «Золоті ворота». Очікується поєднання кількох станцій середмістя з підземними

багатофункціональними комплексами (подібно до «Глобусу» й «Метрограду») і наземними торгівельно-розважальними і спортивними центрами.

Тенденції майбутнього освоєння підземного простору мегаполісів свідчать про значні перспективи будівництва систем автомобільних тунелів. Безсумнівно, що в середньо терміновій перспективі протяжні автомобільні тунелі стануть новим і вкрай важливим напрямком розвитку транспортної інфраструктури м. Києва, який повинен суттєво збільшити пропускну спроможність транспортної мережі, сприяти збереженню історичної забудови в середмісті й розвантажити його від транзитних транспортних потоків. Кількість автомобільних тунелів, що планується звести відповідно до Генерального плану розвитку Києва до 2025 р. складає 8, причому три з них пройдуть під Дніпром, а п'ять будуть з'єднувати транспортні артерії міста в межах правого берега (рис. 1.2). Слід зазначити, що військові події на Сході України та пов'язані з ними економічні фактори можуть змістити строки реалізації цих проектів, але Київ не відмовиться від тунельного освоєння підземного простору в середньостроковій перспективі.

Для розвантаження Набережного шосе, бульвару Лесі Українки та інших магістралей в центральній частині міста, згідно Комплексної схеми транспорту міста Києва на період до 2020 р., було запропоновано спорудити два тунелі: від правобережного підходу до Подільського мостового переходу до площі Героїв Великої Вітчизняної війни та на подовження вулиці Саксаганського з виходом на перетин вулиці Мечникова та Кловського узвозу. Зменшити транспортне навантаження центральних вулиць та моста «Метро» можливо при будівництві ще одного тунелю – від площі Перемоги до Броварського проспекту з підрічною дільницею паралельно існуючому мосту «Метро». Нажаль на сьогодні спостерігається помітне відставання проектної підготовки будівництва тунелів від зазначених вище документів.

Тунелі, що плануються на правому березі пройдуть в умовах розчленованого рельєфу, в межах ділянок, що складені осадовими породами (суглинки, супіски,

леси). Ці породи мають низький рівень міцності. Сформовані водоносні горизонти знаходяться переважно на глибині 4 м, а також виходять на поверхню (лесові останці). Хоча геологічне середовище Києва є складним, проте на більшості територій воно є сприятливим для тунельного будівництва, а сучасні досягнення геобудівельних технологій дозволяють проходити ділянки будь-якої складності. За «оптимістичним сценарієм» у найближчі десять років у Києві може бути споруджено понад 20 км транспортних тунелів, що буде потребувати близько 200 тис. $м^3$ високоякісного армованого бетону (монолітного, набризкового, збірного), а також анкерних систем кріплення. Потенціал заводів будівельних матеріалів Київської області здатен забезпечити стале зростання обсягів підземного будівництва.

Вельми перспективною, на думку авторів, є ідея спорудження автомобільного тунелю під вулицею Хрещатик (нижче підземних торгівельних комплексів), що дозволить зробити головну вулицю столиці пішохідною, значно скоротить викиди вихлопних газів у центрі міста.

Ще одна авторська пропозиція стосується переведення існуючого автомобільного потоку в підземний тунель на ділянці вулиці Набережно-Хрещатицька від Річкового вокзалу (Поштової площі) до церкви Миколи Чудотворця (або до Гаванського мосту). Загалом ця ділянка Подолу проектувалася у свій час як зручна транспортна розв’язка, зручна для автомобілів, а не для людей. За останнє десятиріччя майже всі набережні європейських столиць стали пішохідними зонами з вільним виходом до річок (усі автомагістралі та естакади були демонтовані або переведені в підземний простір). Асоціація України з Європейським Союзом дає гарні шанси на співфінансування подібного проекту в українській столиці. Для Києва утворення рекреаційної туристичної зони на найбільш атракційній дільниці старого Подолу з вільним виходом до Дніпра й підземним археологічним музеєм на Поштовій площі стане вагомим кроком до набуття європейського рівня сучасної архітектурної культури.

Більш детально розглянемо перспективи будівництва автомобільних тунелів з точки бачення екологічної безпеки. Основною проблемою є забруднення повітряного простору міст шкідливими вихлопними газами, зокрема продуктами окиснення й неповного згоряння вуглеводневого палива: монооксиду вуглецю, оксиду азоту, канцерогенних вуглеводнів та ін., причому найбільші викиди припадають на CO (табл. 2.12).

Таблиця 2.12 – Прогноз річних пробігових викидів шкідливих речовин (дані з Комплексної схеми транспорту міста Києва на період до 2020 р.)

Тип	NO_2	Pb	CO	C_xH_y	C	SO_2
2004	3314,94	111,91	17191,14	2324,68	97,82	351,80
2020	9105,30	173,02	28107,56	3809,14	464,28	1236,26
%	+174,7	+54,6	+63,5	+63,9	+374,6	+251,4

Як свідчить табл. 2.11, обсяги викидів шкідливих речовин у міській простір зросли за 16 років в 1,55 – 4,75 рази (в залежності від типу речовин). Концентрація шкідливих речовин у повітрі магістральних транспортних артерій міста є не менш загрозливою, ніж концентрація шкідливих речовин в осередках потужних хімічних та металургійних виробництв. Така ситуація є неприйнятною і вимагає різкого зниження викидів і токсичності вихлопних газів.

Суттєве зменшення транспортних і екологічних проблем столиці пов’язане з розвитком міського тунельного будівництва.

Крім очевидних переваг, пов’язаних з великою швидкістю пересування автомобільними тунелями (відсутність світлофорів, пішохідних переходів, перетинання ліній руху та ін.), вперше відкривається можливість вирішити проблему екологічного забруднення великих міст. Якщо припустити, що в підземному просторі автомобіль буде проходити 60-70% транспортного шляху, а вихлопні гази, які потрапили в тунель, вдасться відвести, утилізувати чи очистити,

то шкідливі викиди в атмосферу міста зменшаться в 2,5–3 рази, що якісно змінить екологію довкілля й позитивно вплине на тривалість життя містян.

Розроблена й апробована модель оцінювання ділянок потенційного будівництва тунелів [78, 98] дозволяє оцінити пріоритетність будівництва об’єктів підземної транспортної інфраструктури мегаполісів з урахуванням екологічних і техногенних ризиків, зокрема найбільш доцільним виступає будівництво тунелю № 5 (див. рис. 1.2) для швидкого покращення транспортної та екологічної ситуації в середмісті Києва.

Розглядаючи проекти майбутніх тунелів Києва слід зупинитися на підземних переходах Дніпра. Серед очевидних переваг підводних тунелів у порівнянні з мостами слід відзначити зручності річкового судноплавства, оскільки русло ріки не захаращується мостовими опорами, а проліт мосту не обмежує висоту судна; можливість вести будівельні роботи протягом року (без сезонних простоїв мостового будівництва), що забезпечує конкурентні швидкості спорудження переходів; оптимальний характер трас метрополітенів глибокого закладання, які проходять під річками; можливості очищення вихідного повітря автомобільних тунелів, що покращує екологічний стан довкілля; значні переваги в безпеці підземного переходу річок у випадку військової або диверсійної діяльності.

Останній аргумент був вирішальним для перших спроб проведення тунелів під Дніпром у 1936 р., коли завершувалось будівництво Київського укріпленого району. Будівництво вели кесонним способом. Одночасно споруджували десятки компресорних станцій для подавання повітря, численні трансформаторні підстанції, а також бетонні заводи, які монтували в безпосередній близькості від траси тунелю, щоб скоротити відстані для транспортування важких бетонних секцій. Проте до червня 1941 р. було споруджено лише кількасот метрів підземного шляху. Після війни проект не оновлювали.

Ще однією можливістю створення тунельного переходу під Дніпром могло стати будівництво тунельного переходу Дніпра Київським метрополітеном

(відкритий 1960 р.). Незважаючи на успішний світовий досвід будівництва та експлуатації підводних метротунелів, вибір прийшовся на мостовий перехід між правим і лівим берегами Дніпра. Проте перспективи розвитку Київського метрополітену не виключають у майбутньому можливості поєднання берегів Дніпра метротунелем.

Найбільш перспективним для тунельного будівництва може стати південний перехід кільцевої дороги навколо Києва в районі м. Українка. Проектом будівництва першої черги кільцевої дороги навколо Києва передбачено спорудження південного мостового переходу через р. Дніпро (див. рис. 1.2), причому проектна довжина мосту складає 4510 м. Наріжним каменем питання є економічні покажчики тунельного переходу під Дніпром. Складність техніко-економічного обґрунтування будівництва тунелів на даному етапі зумовлена відсутністю комплексних інженерно-геологічних пошукувань на трасі майбутнього тунелю, що унеможливлює точні розрахунки його технологічних і конструктивних параметрів. Проте світовий і український досвід спорудження тунелів дозволяє окреслити певний діапазон імовірної вартості подібних споруд і використовувати цю інформацію для аналізу в першому наближенні.

Велике розмаїття типів, розмірів, конструктивних рішень і способів спорудження, а також геологічних умов будівництва та експлуатації тунелів окреслюють їх вартість у вельми широкому діапазоні. Аналіз будівництва транспортних тунелів у країнах Європейського Союзу за останні два десятиріччя свідчить, що весь цей діапазон знаходився в межах $ 20–150 млн. за 1 км тунелю. Підводні тунелі не стали винятком і також не виходять за межі цього діапазону. В Японії 1 км найбільшого підводного тунелю світу Сейкан обійшовся у $ 68 млн., вартість 1 км транспортної гілки Євротунелю коштував близько $ 120 млн. Рекорд економічності поставив перший із запланованої мережі автомобільних тунелів Ілона Маска, споруджений у передмісті Лос-Анджелеса, вартість якого склала лише $ 5 млн. за 1 км.

Кошт спорудження тунелів в Україні ніколи не перебільшував середніх значень із зазначеного вище діапазону. Наприклад, вартість одного з найбільших транспортних проектів останнього часу – Бескидського тунелю Львівської залізниці, який був завершений у 2018 р., складає при довжині 1822 м і ширині 10,5 м – $ 104 млн. (тобто 1 км тунелю разом з порталом коштував близько $ 57 млн.). Проект першої черги будівництва київського метрополітену до житлового масиву Троєщина передбачає середню вартість 1 км тунелю разом із станцією близько $ 34 млн. (за даними преси). Аналіз інших численних даних з різних країн свідчить, що навіть в особливо складних геологічних умовах кошт будівництва автомобільних і залізничних тунелів у більшості випадків не перевищував $ 100 млн. за 1 км, а в стабільних геологічних умовах лежить у межах $ 30 – 60 млн.

Наведені дані дозволяють з великим ступенем імовірності стверджувати, що кошторис будівництва тунелю під Дніпром в районі міста Українка не вийде за межі $ 60 млн. за 1 км. Якщо орієнтуватися на цей граничний показник, то загальна вартість двох тунелів з однобічним рухом орієнтовно складе 4,51км×60млн.×2 = $ 541 млн. У порівнянні із проектним варіантом мостового переходу це може дати економію до 15–20% від вартості будівництва, що свідчить на користь тунельного переходу.

Крім того, тунельний варіант забезпечить більшу довговічність і надійність споруди, а в разі збільшення протяжності тунелю, може пройти під м. Українка, чим повністю вирішить екологічну проблему, пов’язану з проходженням ділянки кільцевої магістралі містом, а також позбавить необхідності відчуження приватних земель для будівництва траси. З огляду на це доцільним бачиться проведення попередніх інженерно-геологічних пошукувань і порівняльної техніко-економічної експертизи мостового й тунельного варіантів спорудження південного переходу кільцевої дороги через Дніпро.

Менш помітним, проте не менш значимим, виходячи з великої протяжності й функціональної значимості, залишається система каналізаційних колекторів

столиці, серед яких треба виділити спорудження другої дублюючої нитки міського каналізаційного колектора протяжністю близько 10 км при діаметрі 3 м (будувалася протягом 1994 – 2020 рр.). Це суттєво збільшило надійність системи відведення стічних вод у Оболонському, Подільському, частині Шевченківського районів Києва, а також у прилеглих Вишгороді, Ірпені, Бучі.

Одним із масштабних інфраструктурних проектів останнього часу, який отримав фінансування від уряду Японії є реконструкція Бортницької станції аерації, яка повинна значно підвищити надійність каналізації та очищення стічних вод й вирішити низку екологічних проблем. «Слабкою ланкою» в цій системі залишаються дюкери (металеві труби), що прокладені дном Дніпра й забезпечують перепускання стічних вод з правого на лівий берег. Стан деяких дюкерів був небезпечний. Для виправлення ситуації було прийняте рішення про збільшення надійності дюкерів шляхом протягування в них поліетиленових оболонок, проте ці заходи слід розглядати лише як тимчасові.

Авторами вносилась пропозиція транспортування стічних вод з правого на лівий берег екологічно безпечним підземним дюкером [68], який би продовжувався підземним колектором до Бортницької станції аерації. Реалізація проекту унеможливить прориви нечистот у Дніпро та забезпечить надійне перепускання існуючих каналізаційних стоків і можливість їх збільшення з урахуванням перспектив зростання міста й передмість. Нормативний строк експлуатації підземного дюкера – 100 років, хоча досвід експлуатації тунелів історичних міст свідчить про можливості значного збільшення цього показника. У розділі 3 з урахуванням методів прикладного системного аналізу доведена значна перевага тунельного дюкера над трубними в умовах природних, техногенних і військових (диверсійних) загроз.

Перспективною є також добра узгодженість взаємодії нової гілки міського каналізаційного колектора з підземним дюкером у рамах системної реконструкції мережі каналізаційних споруд міста та Бортницької станції аерації [97]. Важливо,

що досвід підземного будівництва дюкера під Дніпром, який можна пройти щитовим способом, може бути використано для спорудження низки запланованих автомобільних тунелів, що значно покращить перспективи системного освоєння підземного простору Києва. Відносно невелика вартість дюкера (за попередніми оцінками – близько $40–50 млн.) також є вагомим аргументом на користь цього проекту. За підтримки КМДА пропозиція будівництва підземного дюкера була рекомендована до включення в Генеральний план розвитку Києва.

Слід зазначити важливість системного підходу до планування розвитку підземного простору Києва й підводних тунелів під Дніпром. Якщо підходити до будівництва таких споруд як до спільного комплексу (автомобільні й метро тунелі, підземний дюкер під Дніпром, тунель на кільцевій автомагістралі тощо), то поєднання геоінформації, напрацьованого досвіду, щитових прохідницьких агрегатів і обладнання, виробництва й постачання будівельних матеріалів – зможуть кардинально зменшити витрати на підземне будівництво зазначених об’єктів, підвищити якість і ефективність прохідницьких робіт.

Міське підземне будівництво в багатьох європейських столицях значною мірою було пов’язане зі спорудженням великих підземних паркінгів і багатофункціональних комплексів. Київські підземні торгівельні центри «Глобус» і «Метроград» є початком комплексного освоєння підземного простору середмістя столиці, причому більшість площ міста (за виключенням безпосередньо контактуючих з видатними пам’ятками архітектури) можуть розглядатися як потенційні об’єкти розвитку підземної урбаністики.

Перспективним напрямком розвитку підземних інженерних комунікацій може стати перенесення існуючих на поверхні електромереж у підземний простір, що відкриє нові можливості для забезпечення безпеки електромереж і забудови міських ділянок, освоєння яких сьогодні обмежене нормами експлуатації ЛЕП.

Важливим напрямком застосування геотехнологій є ревалоризація давніх підземних споруд, зокрема сакральних споруд, що мають релігійну й туристичну

цінність. Під Києвом існує близько 300 підземних історичних об’єктів, з яких на сьогодні досліджено близько 20%, а до туристичного доступу відкрито лише одиниці (приміром, печери Києво-Печерської лаври). Особливо складним завданням є відновлення давніх гірничих виробок, які формують підземну туристичну трасу із збереженням автентичності історичних споруд. Для вирішення цього завдання треба застосовувати сучасні геотехнології, причому комплексна методика ревалоризації підземних об’єктів повинна забезпечити: оцінку стану підземного об’єкту та вміщуючого породного (ґрунтового) масиву; систему заходів для зміцнення оточуючих порід і підсилення кріплення; ремонт і відновлення зруйнованих ділянок старих виробок; забезпечення водовідливу та вентиляції; проведення інструментального моніторингу безпеки підземної споруди. При цьому згідно з принципами ревалоризації (критерії автентичності, історичної, зовнішньої та доданої цінності) способи й конструкції підтримання виробок повинні відповідати історичним аналогам, або мати приховані форми (ін’єкційне зміцнення оточуючих порід, анкерне кріплення тощо).

Серед перспективних об’єктів цього напрямку треба зазначити проектування підземної частини майбутнього археологічного Музею на Поштовій площі із збереженням унікальних знахідок міського прибережного осередку Києва XI-XIII століть (частини садиб, вулиць, провулків). Важливо, щоб відтворені міські пам’ятки та музейні експозиції давали не тільки змогу ознайомлення зі світом колишніх споруд і технологій, але й розкривали внутрішній духовний світ, традиції й культурні надбання старого Києва, переносили кращі духовні здобутки в день прийдешній.

Узагальнюючи зазначимо, що обмеженість вільних площ для наземної забудови та недостатня вирішеність екологічних та безпекових проблем в умовах загроз гібридної війни переорієнтує значну частину інвестиційних коштів на масштабне підземне будівництво, заплановане в Києві на наступне десятиріччя, яке буде здійснюватися в багатьох районах міста, переважно на Правобережжі, а

також під Дніпром. Сучасні досягнення в галузі будівельних матеріалів і геотехнологій спроможні забезпечити стійкість і надійність підземних споруд навіть в складних умовах будівництва й експлуатації, дозволяють застосовувати високотехнологічні способи монтажу конструкцій, чим прискорюють введення об’єктів в експлуатацію, сприяють ресурсо- та енергозбереженню під час проведення будівельних робіт і експлуатації урбаністичних об’єктів. Системність і узгодженість стратегічних планів розвитку наземного й підземного Києва, використання розробленого інструментарію планування підземної інфраструктури великих міст для забезпечення мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного забезпечить ефективний розвиток підземної урбаністики столиці.

3 СИСТЕМНІ КОНЦЕПТИ ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ КРИТИЧНИМ РИЗИКАМ

3.1 Побудова і тестування моделі модифікованим методом морфологічного аналізу

3.1.1 Процедура побудови моделі в модифікованому методі морфологічного аналізу

Після визначення параметрів і альтернатив МТ встановлюється сила зв’язку між альтернативами різних параметрів, якщо такий зв’язок є присутнім. Розрізняють зв’язки двох типів: взаємозалежність альтернатив (для параметрів однієї МТ) і вплив однієї альтернативи на іншу (для параметрів із двох різних МТ).

Вважається, що експерт при оцінюванні об’єкта дає незалежне значення для ймовірності альтернативи параметра, яке не враховує вплив інших альтернатив. Однак, альтернативи можуть бути певним чином пов’язані, і тоді такі комбінації альтернатив будуть більш або менш ймовірними при розгляді конфігурацій об’єкта в цілому. У відповідності до процедур ММА оцінка сили зв’язку має значення в межах [–1; 1]. Пояснення цих значень надані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Пояснення оцінок матриці взаємозв’язків

Оцінка	Пояснення
−1	Альтернативи повністю несумісні; конфігурація з цією парою альтернатив неможлива
(−1;0)	Альтернативи частково несумісні; вибір однієї з них певною мірою зменшує ймовірність вибору іншої
0	Альтернативи незалежні; вибір однієї з них не впливає на вибір іншої
(0;1)	Альтернативи частково пов'язані; вибір однієї з них певною мірою збільшує ймовірність вибору іншої
1	Альтернативи повністю пов'язані; вибір однієї з них тягне за собою вибір іншої

Для оцінювання зв’язків між альтернативами фахівцю в предметній області були надані опитувальні форми для заповнення. Питання щодо пар альтернатив ставились у такій формі:

Чи є зв'язок між альтернативами **1.1. Низький (46 – 53 дБ)** і **3.1. Незначний ($К_{мас}$<0,05, МПа)**
Комбінація неможлива
Сильний негативний (комбінація малоймовірна)
Помірний негативний (менше ймовірність поєднання)
Слабкий негативний (трохи менше ймовірність поєднання)
Немає зв'язку
Слабкий позитивний (трохи більше ймовірність поєднання)
Помірний позитивний (більше ймовірність поєднання)
Сильний позитивний (суттєво більше ймовірність поєднання)
Альтернативи повністю взаємозалежні

Експерту потрібно було обрати варіант відповіді у кожному питанні. Після заповнення опитувальних форм відповіді переводились у числову форму за табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Шкала експертних оцінок взаємозв'язку

Відповідь експерта щодо зв'язку	**Числове значення**
Комбінація неможлива	–1
Сильний негативний	–0,8
Помірний негативний	–0,5
Слабкий негативний	–0,2
Немає зв'язку	0
Слабкий позитивний	0,2
Помірний позитивний	0,5
Сильний позитивний	0,8
Альтернативи повністю взаємозалежні	1

Таким чином, була отримана матриця взаємозв'язків альтернатив параметрів. Фрагмент такої матриці, який показує взаємний вплив параметрів 1 і 3 з морфологічної таблиці, представленої в табл. 1.1, наведено в табл. 3.3. Такі ж фрагменти присутні в матриці для всіх інших пар МТ.

Таблиця 3.3 – Фрагмент матриці взаємозв'язків для параметрів 1 і 3 таблиці 1.1

		3. Показник статичного навантаження оточуючого грунтового масиву			
		3.1	3.2	3.3	3.4
1. Рівень динамічного навантаження	1.1	0,5	0,2	–0,2	–0,5
	1.2	0,2	0,5	0,5	0,2
	1.3	–0,2	0,2	0,5	0,5
	1.4	–0,2	0,2	0,8	0,8

Далі було оцінено вплив параметрів МТ першого етапу (табл. 1.1, 1.3) на параметри МТ другого етапу (табл. 1.2, 1.5). Для опису впливу використовувались оцінки в межах [–1; 1], значення яких пояснюється табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Пояснення оцінок матриці взаємозв'язків

Оцінка	**Пояснення**
−1	Альтернатива параметра незалежної морфологічної таблиці унеможливлює вибір альтернативи параметра залежної таблиці
(−1;0)	Альтернатива параметра незалежної морфологічної таблиці зменшує ймовірність вибору альтернативи параметра залежної таблиці
0	Альтернатива параметра незалежної морфологічної таблиці ніяк не впливає на вибір альтернативи параметра залежної таблиці
(0;1)	Альтернатива параметра незалежної морфологічної таблиці збільшує ймовірність вибору альтернативи параметра залежної таблиці
1	Альтернатива параметра незалежної морфологічної таблиці гарантує вибір альтернативи параметра залежної таблиці

Питання щодо впливу альтернатив МТ незалежних параметрів на альтернативи МТ залежних параметрів ставились фахівцю в предметній області у такій формі:

Чи впливає **1.1. Низький (46 – 53 дБ)** на вагу **А.1. Придатна**
Дуже сильно зменшує
Сильно зменшує
Помірно зменшує
Трохи зменшує
Не впливає
Трохи збільшує
Помірно збільшує
Сильно збільшує
Дуже сильно збільшує

За шкалою, аналогічною табл. 3.2, відповіді були переведені у числову форму і занесені в матрицю зв'язків, фрагмент якої представлено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Фрагмент матриці зв’язків для параметра 1 МТ першого етапу і параметрів А–С МТ другого етапу оцінювання інженерно-геологічних факторів

		А. Придатність ділянки		В. Масштаб об’єкта				С. Глибина забудови			
		А.1	А.2	В.1	В.2	В.3	В.4	С.1	С.2	С.3	С.4
1. Рівень динамічного навантаження	1.1	0,5	–0,5	0	0	0	0	0,5	0,2	0	0
	1.2	0,2	–0,2	0,2	0,2	–0,2	–0,2	–0,2	–0,2	0,2	0,2
	1.3	–0,2	0,2	0,2	0,2	–0,5	–0,8	–0,5	–0,5	0,5	0,5
	1.4	–0,8	0,8	0,2	–0,2	–0,5	–0,8	–0,8	–0,5	0,5	0,8

3.1.2 Використання розробленої моделі для оцінювання ділянок потенційного будівництва тунелів

За допомогою створеної моделі можна проводити оцінювання ділянок для будівництва. Вхідними даними для такої задачі є експертна думка щодо ймовірностей альтернатив морфологічних таблиць першого етапу (табл. 1.1, 1.3), тобто характеристик ділянки потенційного будівництва тунелю. Процедура оцінювання складається з таких основних кроків:

1) отримання інформації від експерта за допомогою опитувальної форми;
2) переведення відповідей експерта у числову форму і розрахунок оцінок альтернатив першої МТ з урахуванням взаємозалежностей між ними;
3) розрахунок оцінок другої МТ на основі множини можливих конфігурацій першої МТ і матриці зв’язків.

На першому кроці експерту надається опитувальна форма щодо ділянки, яку потрібно оцінити. В цій опитувальній формі наводяться питання щодо вірогідності кожної альтернативи кожного параметра для ділянки, що досліджується. Питання можуть ставитись у такій формі:

*1. Вкажіть, наскільки розглядуваній ділянці відповідають характеристики щодо параметра «**Рівень динамічного навантаження**»*

*1.1. Чи вірне твердження, що для ділянки **Рівень динамічного навантаження – Низький (46 – 53 дБ)***

Однозначно ні	Переважно ні	Скоріше ні, ніж так	І так, і ні в рівній мірі	Скоріше так, ніж ні	Переважно так	Однозначно так

*1.2. Чи вірне твердження, що для ділянки **Рівень динамічного навантаження – Середній (53 – 73 дБ)***

Однозначно ні	Переважно ні	Скоріше ні, ніж так	І так, і ні в рівній мірі	Скоріше так, ніж ні	Переважно так	Однозначно так

*1.3. Чи вірне твердження, що для ділянки **Рівень динамічного навантаження – Підвищений (73 – 96 дБ)***

Однозначно ні	Переважно ні	Скоріше ні, ніж так	І так, і ні в рівній мірі	Скоріше так, ніж ні	Переважно так	Однозначно так

*1.4. Чи вірне твердження, що для ділянки **Рівень динамічного навантаження – Високий (більше 96 дБ)***

Однозначно ні	Переважно ні	Скоріше ні, ніж так	І так, і ні в рівній мірі	Скоріше так, ніж ні	Переважно так	Однозначно так

Експерт обирає відповіді, які, на його думку, найбільш точно характеризують ймовірність появи відповідної альтернативи для розглядуваної ділянки. Якщо інформація щодо відповідного параметра ділянки достеменно відома, експерт може обрати відповідь «Однозначно так» для однієї з альтернатив і «Однозначно ні» для всіх інших. Кількість питань у опитувальній формі відповідає загальній кількості альтернатив першої МТ. У зв’язку з наявністю двох МТ першого етапу в даному дослідженні анкета для ділянки потенційного будівництва тунелю складалась із 69 питань – 38 питань щодо альтернатив параметрів інженерно-геологічних факторів і 31 питання щодо альтернатив параметрів структурно-функціональних факторів. Оцінки експерта переводяться у числову форму за шкалою з табл. 3.6, після чого нормуються.

Таблиця 3.6 – Шкала експертних оцінок альтернатив параметрів

Відповідь експерта щодо твердження	**Числове значення**
Однозначно ні	0
Переважно ні	0,2
Скоріше ні, ніж так	0,35
І так, і ні в рівній мірі	0,5
Скоріше так, ніж ні	0,65
Переважно так	0,8
Однозначно так	1

Позначимо параметри першої МТ як $F_i, i \in [1, N]$, де N – кількість параметрів, в даному дослідженні $N = 10$. Альтернативи параметра F_i позначимо як $a_j^{(i)}, i \in [1, N], j \in [1, n_i]$, де n_i – кількість альтернатив параметра F_i. Нормовані експертні оцінки альтернатив параметрів позначимо як $p_j'^{(i)}$.

Зазначимо, що відповіді експерта, скоріше за все, не враховуватимуть взаємозв'язки між альтернативами, тому оцінки альтернатив перераховуються з використанням матриці взаємозв'язків, описаної раніше. Розрахунки основані на розв'язанні системи рівнянь для ймовірностей. При цьому значення умовної ймовірності апроксимуються на основі значень попередньої (незалежної) ймовірності і значень матриць взаємозв'язків, дотримуючись ряду правил [39].

$$P(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, ..., a_{j_N}^{(N)}\} \mid a_{j_1}^{(1)}) = \frac{P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, ..., a_{j_N}^{(N)}\} \mid a_{j_1}^{(1)})}{\sum_{k_2=1}^{n_2} \sum_{k_3=1}^{n_3} ... \sum_{k_N=1}^{n_N} P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{k_2}^{(2)}, ..., a_{k_N}^{(N)}\} \mid a_{j_1}^{(1)})}, \tag{3.1}$$

де

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

Система рівнянь для ймовірностей має вигляд

$$\begin{cases} \vec{x}_1 = P_1 \vec{x}_2; \|\vec{x}_1\| = 1; \\ \vec{x}_2 = P_2 \vec{x}_3; \|\vec{x}_2\| = 1; \\ ... \\ \vec{x}_{N-1} = P_{N-1} \vec{x}_N; \|\vec{x}_{N-1}\| = 1; \\ \vec{x}_N = P_N \vec{x}_1; \|\vec{x}_N\| = 1. \end{cases} \tag{3.2}$$

В [11] показано, що розв'язком системи (3.2) можна знайти у вигляді (3.3)

$$p_{j_k}^{(i_k)} = \frac{p_{j_k}'^{(i_k)} \sum_{j_1=1}^{n_1} ... \sum_{j_{k-1}=1}^{n_{k-1}} \sum_{j_{k+1}=1}^{n_{k+1}} ... \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 ... j_N} p_{j_1}'^{(i_1)} ... p_{j_N}'^{(i_N)}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} ... \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 ... j_N} p_{j_1}'^{(i_1)} ... p_{j_N}'^{(i_N)}}. \tag{3.3}$$

Враховуючи (3.1) і (3.3), також знаходимо ймовірність будь-якої конфігурації

$$P(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, ..., a_{j_N}^{(N)}\}) = \frac{C_{j_1 j_2 ... j_N} p_{j_1}'^{(i_1)} ... p_{j_N}'^{(i_N)}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} ... \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 ... j_N} p_{j_1}'^{(i_1)} ... p_{j_N}'^{(i_N)}}. \quad (3.4)$$

Наступним кроком є обчислення оцінок альтернатив другої МТ (табл. 1.2, 1.5), тобто очікуваних результативностей рішень щодо ділянки. Оцінка альтернативи залежної морфологічної таблиці розраховується із таких міркувань: спочатку визначається умовна оцінка альтернатив при кожній конкретній конфігурації незалежної МТ. В даному дослідженні вважалося, що альтернативи других МТ без інформації про ділянку є однаково значущими, тому для розрахунку умовної результативності використано співвідношення (3.5)

$$R(a_1^{(d)} \mid \{a_{j_1}^{(1)}, ..., a_{j_N}^{(N)}\}) = \frac{\prod_{i=1}^{N} c_{ij_i,d1}}{\sum_{k=1}^{n_d} \left(\prod_{i=1}^{N} c_{ij_i,dk} \right)}. \quad (3.5)$$

Тут d – позначення параметра другої МТ. Оцінку $R(a_1^{(d)})$ альтернативи $a_1^{(d)}$ з урахуванням можливості появи будь-якої конфігурації незалежної морфологічної таблиці визначаємо у такий спосіб:

$$R(a_1^{(d)}) = \sum_{j_1=1}^{n_1} ... \sum_{j_N=1}^{n_N} R(a_1^{(d)} \mid \{a_{j_1}^{(1)}, ..., a_{j_N}^{(N)}\}) P(\{a_{j_1}^{(1)}, ..., a_{j_N}^{(N)}\}). \quad (3.6)$$

Якщо позначити $C_{j_1 j_2 ... j_N}^{(d_k)} = \prod_{i=1}^{N} c_{ij_i,dk}$, то, враховуючи (3.4–3.6), оцінку альтернативи другої МТ легко знайти у вигляді:

$$R(a_1^{(d)}) = \frac{C_{j_1 j_2 ... j_N} C_{j_1 j_2 ... j_N}^{(d_1)} p_{j_1}'^{(i_1)} ... p_{j_N}'^{(i_N)}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} ... \sum_{j_N=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_d} C_{j_1 j_2 ... j_N} C_{j_1 j_2 ... j_N}^{(d_k)} p_{j_1}'^{(i_1)} ... p_{j_N}'^{(i_N)}}.$$

Оцінки $R(a_1^{(d)})$ показують долю результативності, або вагу альтернативи $a_1^{(d)}$ параметра F_d, тобто порівнюючи оцінки $a_1^{(d)},...,a_{n_d}^{(d)}$, можна визначити, які з альтернатив параметрів табл. 1.2, 1.5 в більшій мірі характеризують ділянку, і які співвідношення між цими альтернативами.

3.1.3 Експеримент зі штучним підвищенням ймовірності пливуна в моделі

Враховуючи, що в дослідженні аналізується придатність ділянки саме для протяжних тунелів, особливу увагу було приділено параметру 7 з табл. 1.1, зокрема його альтернативі 7.4 («Наявні підтоплення та/або пливуни»). Були оцінені зв'язки з цією альтернативою, оскільки у випадку будівництва тунелів висока ймовірність цієї альтернативи різко підвищує ризики, пов'язані з будівництвом і суттєво знижує привабливість ділянки.

Для тестування цих змін було взято одну з ділянок попереднього дослідження [41], і в ній штучно внесено підвищення ймовірності пливуна. Решта оцінок альтернатив залишились незмінними. В табл. 3.7 показано, як зміни в матриці взаємозв'язків вплинули на результат, зокрема для альтернативи «А. Придатність ділянки».

Таблиця 3.7 – Експеримент зі штучним підвищенням ймовірності альтернативи «Наявні підтоплення та/або пливуни»

Низька ймовірність пливуна (безпечна ділянка)				
Оцінки параметра 7.4	Стара модель		Нова модель	
{0,2; 0,8; 0,2; 0,2}	А.1. Придатна	0,993	А.1. Придатна	0,898
	А.2. Непридатна	0,007	А.2. Непридатна	0,102
Підвищена ймовірність пливуна (ризикована ділянка)				
Оцінки параметра 7.4	Стара модель		Нова модель	
{0,2; 0,5; 0,5; 0,5}	А.1. Придатна	0,987	А.1. Придатна	0,768
	А.2. Непридатна	0,013	А.2. Непридатна	0,232
Висока ймовірність пливуна (небезпечна ділянка)				
Оцінки параметра 7.4	Стара модель		Нова модель	
{0,2; 0,2; 0,2; 0,8}	А.1. Придатна	0,981	А.1. Придатна	0,498
	А.2. Непридатна	0,019	А.2. Непридатна	0,502

З табл. 3.7 видно, що нова модель, на відміну від старої, більш адекватно реагує на збільшення ймовірності пливуна в геологічному середовищі, істотно зменшуючи вагу альтернативи «А.1. Придатна» навіть для дуже сприятливої з точки зору всіх інших альтернатив ділянки. Тут також потрібно зазначити, що через те, що зміни в параметрі 7 були штучними, виникала певна невідповідність між цим параметром і іншими, тому на першому етапі МММА модель намагалась «виправити» штучні збурення, частково нівелюючи їх. Незважаючи на це, експеримент явно показує більшу відповідність нової моделі поставленій задачі.

3.1.4 Результати тестування альтернативних ділянок потенційного будівництва тунелів

Для тестування розробленої моделі використовувались дві ділянки потенційного будівництва тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва – тунель №1 (Ботанічний сад – Дарницький міст) і тунель №5 (частина Площа Перемоги – Дніпро) з рис. 1.2.

Результати експертного оцінювання даних геологічного середовища (табл. 1.1) і уточнені оцінки за процедурою першого етапу МММА наведені в табл. 3.8. В цій таблиці у стовпчику «Вхід» надано нормовані оцінки, отримані шляхом експертного оцінювання, у стовпчику «Розр.» надано розрахункові значення з першого етапу процедури МММА, які враховують взаємозв’язки між всіма параметрами. Як видно з таблиці, принципових змін у розподілах ймовірностей альтернатив не відбулось, отже експертне оцінювання проведено достатньо якісно, і оцінки параметрів добре узгоджуються між собою.

Таблиця 3.8 – Оцінки геологічного середовища для трас двох тунелів

Параметр	Альтернативи параметра	Тунель 1		Тунель 5	
		Вхід	Розр.	Вхід	Розр.
1. Рівень динамічного навантаження	1.1. Низький (46 – 53 дБ)	0,143	0,137	0,093	0,070
	1.2. Середній (53 – 73 дБ)	0,327	0,489	0,302	0,448
	1.3. Підвищений (73 – 96 дБ)	0,327	0,238	0,372	0,299
	1.4. Високий (більше 96 дБ)	0,204	0,136	0,233	0,182
2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови	2.1. Незначний ($К_{сн}$<1)	0,206	0,101	0,000	0,000
	2.2. Помірний (1<$К_{сн}$<2)	0,471	0,584	0,194	0,164
	2.3. Відносно високий (2<$К_{сн}$<3,5)	0,206	0,215	0,444	0,451
	2.4. Високий ($К_{сн}$>3,5)	0,118	0,100	0,361	0,385
3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву	3.1. Незначний ($К_{мас}$<0,05, МПа)	0,175	0,063	0,093	0,015
	3.2. Помірний (0,05<$К_{мас}$<0,3, МПа)	0,400	0,703	0,302	0,485
	3.3. Високий (0,3<$К_{мас}$<0,5, МПа)	0,325	0,200	0,372	0,362
	3.4. Вельми високий ($К_{мас}$>5, МПа)	0,100	0,034	0,233	0,138
4. Вплив існуючих підземних об’єктів	4.1. Відсутній (відстань понад 50 м)	0,129	0,055	0,108	0,032
	4.2. Незначний (відстань 20 – 50 м)	0,516	0,422	0,432	0,336
	4.3 Впливовий (відстань 10 – 20 м)	0,226	0,437	0,351	0,584
	4.4 Загрозливий (відстань ближче 10 м)	0,129	0,087	0,108	0,048
5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів	5.1. Невивітрилі глини та піски середньої щільності	0,175	0,269	0,265	0,320
	5.2. Техногенні відклади	0,100	0,127	0,143	0,157
	5.3. Делювіальні глинисті ґрунти (водонасичені), обводнені надзаплавні піски	0,400	0,402	0,327	0,354
	5.4. Просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул)	0,325	0,203	0,265	0,169
6. Розрахунковий опір грунту	6.1. Дуже міцні ґрунтові основи >300 кПа	0,000	0,000	0,093	0,091
	6.2. Міцні 200-300 кПа	0,121	0,113	0,233	0,328
	6.3. Ґрунти середньої міцності 150-200 кПа	0,485	0,575	0,372	0,402
	6.4. Відносно міцні ґрунти <150 кПа	0,394	0,313	0,302	0,179
7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки	7.1. Водоносні горизонти у $P\text{-}N_{1пр}$	0,217	0,193	0,372	0,383
	7.2. Глибина залягання ґрунтових вод > 3 *м*, напірних > 10 *м*	0,283	0,365	0,372	0,474
	7.3. Глибина залягання ґрунтових вод < 3 *м*, напірних < 10 *м*	0,348	0,358	0,093	0,089
	7.4. Наявні підтоплення та/або пливуни	0,152	0,084	0,163	0,054
8. Тип рельєфу і морфометрія	8.1. Пласкі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини	0,143	0,159	0,000	0,000
	8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів	0,265	0,340	0,194	0,353
	8.3. Долини малих річок, слабко розчленовані схили, висока заплава	0,327	0,416	0,361	0,536
	8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава	0,265	0,086	0,444	0,111
9. Інженерно-геологічні процеси	9.1. Відсутні	0,082	0,043	0,093	0,027
	9.2. Процеси застабілізовані	0,265	0,320	0,302	0,303
	9.3. Прояв зсувних зміщень незначних об’ємів	0,327	0,527	0,372	0,586
	9.4. Активний прояв просідання, підтоплення, гравітаційних процесів	0,327	0,109	0,233	0,084
10. Геотехнології будівництва	10.1. Відкриті	0,200	0,364	0,200	0,119
	10.2. Підземні	0,800	0,636	0,800	0,881

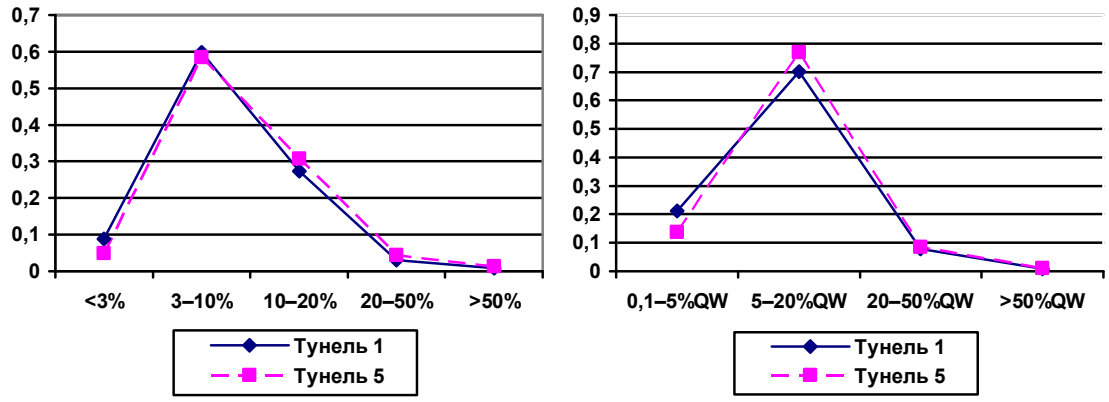
На основі розрахованих значень проведено другий етап МММА для отримання оцінок результативностей рішення щодо інженерно-геологічних факторів:

Таблиця 3.9 – Результати розрахунку оцінок альтернатив табл. 1.2

Параметр	Альтернатива	Тунель 1	Тунель 5
A. Придатність ділянки	A.1. Придатна	0,777	0,799
	A.2. Непридатна	0,223	0,201
B. Масштаб об'єкта	B.1. Площа перерізу до 10 м^2	0,643	0,712
	B.2. Площа перерізу до 25 м^2	0,255	0,232
	B.3. Площа перерізу до 40 м^2	0,084	0,049
	B.4. Площа перерізу понад 40 м^2	0,018	0,007
C. Рівень забудови	C.1. 0–10 м	0,096	0,021
	C.2. 10–20 м	0,183	0,100
	C.3. 20–60 м	0,445	0,360
	C.4. глибше 60 м	0,276	0,518
D. Фактор ризику	D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності	0,039	0,046
	D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд	0,348	0,417
	D.3. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти	0,067	0,111
	D.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів	0,547	0,426
E. Ступінь ризику	E.1. <3%	0,089	0,050
	E.2. 3–10%	0,598	0,584
	E.3. 10–20%	0,274	0,308
	E.4. 20–50%	0,031	0,044
	E.5. >50%	0,009	0,014
F. Рівень ризику	F.1. 0,1–5% QW	0,212	0,137
	F.2. 5–20% QW	0,701	0,768
	F.3. 20–50%QW	0,079	0,085
	F.4. >50% QW	0,008	0,010

З табл. 3.9 можна зробити висновок, що обидва тунелі достатньо сприятливі для будівництва (вага альтернативи «A.1. Придатна» суттєво перевищує вагу «A.2. Непридатна»), причому в приблизно рівній мірі. Для тунелю 5, відповідно до його характеристик, розраховані значення яких наведені в табл. 2.8, модель пропонує менші розміри перерізу і більшу глибину залягання (вага альтернативи «C.4. глибше 60 м» складає 0,518 для тунелю 5 і 0,276 для тунелю 1). Також дві розглядуваних ділянки мають дещо різні профілі найбільш вірогідних ризиків – для тунелю 1 найбільш вірогідним є фактор ризику «D.4. Ініціація зсувних явищ та

інших інженерно-геологічних процесів», вага якого складає 0,547, що значно перевищує наступний за значимістю фактор «D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд», вага якого складає 0,348. Для тунелю 5 обидва цих фактори є приблизно рівнозначними (ваги складають 0,426 і 0,417 відповідно). Профілі ступеню і рівня ризику для двох тунелів достатньо близькі, з невеликим зміщенням тунелю 5 в сторону більших ступеня і рівня ризику (рис. 3.1).



а) б)

Рисунок 3.1 – Оцінки ступенів (а) і рівнів (б) ризику для тунелів 1 і 5

Далі було проведене оцінювання структурно-функціональних факторів, морфологічна таблиця для яких наведена в табл. 1.3. Для оцінювання було використано дві моделі, побудовані на основі незалежного оцінювання двома експертами. В табл. 3.10 наведено вхідні оцінки для двох розглядуваних тунелів, а також по два набори оцінок, розрахованих процедурою першого етапу двохетапного МММА з використанням різних моделей, відповідні стовпчики з розрахованими значеннями підписані «Експ1», «Експ2».

Таблиця 3.10 – Вхідні значення оцінок структурно-функціональних факторів тунелів і результати першого етапу ММА

Параметр	Альтернативи параметра	Тунель 1			Тунель 5		
		Вхід	Експ1	Експ2	Вхід	Експ1	Експ2
1. Тип забудови в районі потенційного тунелю	1.1. Житлова забудова	0,197	0,250	0,328	0,258	0,471	0,315
	1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова	0,197	0,194	0,188	0,210	0,298	0,272
	1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти	0,061	0,043	0,068	0,258	0,176	0,261
	1.4. Парки, зони відпочинку	0,242	0,219	0,320	0,210	0,053	0,152
	1.5. Промислова забудова	0,061	0,055	0,069	0,000	0,000	0,000
	1.6. Незабудовані території	0,242	0,240	0,028	0,065	0,002	0,000
2. Щільність житлової забудови	2.1. Дуже низька	0,175	0,130	0,046	0,000	0,000	0,000
	2.2. Низька	0,400	0,450	0,100	0,121	0,039	0,000
	2.3. Середня	0,325	0,332	0,704	0,485	0,488	0,575
	2.4. Висока	0,100	0,088	0,150	0,394	0,473	0,425
3. Фактор середмістя	3.1. Ділянка розташована в зоні середмістя	0,121	0,089	0,285	0,500	0,455	0,845
	3.2. Ділянка впливає на автомобільний рух у середмісті	0,394	0,401	0,164	0,500	0,545	0,155
	3.3. Ділянка поза середмістям	0,485	0,510	0,552	0,000	0,000	0,000
4. Залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю	4.1. Дуже низька	0,233	0,152	0,054	0,100	0,007	0,001
	4.2. Низька	0,372	0,367	0,143	0,100	0,029	0,008
	4.3. Середня	0,302	0,381	0,598	0,400	0,414	0,427
	4.4. Висока	0,093	0,100	0,205	0,400	0,550	0,565
5. Інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю	5.1. Низька	0,093	0,165	0,046	0,000	0,000	0,000
	5.2. Середня	0,302	0,287	0,576	0,289	0,151	0,251
	5.3. Висока	0,372	0,390	0,345	0,356	0,418	0,595
	5.4. Дуже висока	0,233	0,157	0,034	0,356	0,431	0,154
6. Середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю	6.1. до 15 км/год	0,148	0,156	0,033	0,194	0,297	0,159
	6.2. 15-30 км/год	0,259	0,385	0,229	0,444	0,615	0,658
	6.3. 30-60 км/год	0,593	0,459	0,738	0,361	0,088	0,183
7. Наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами	7.1. Дуже погана	0,129	0,110	0,036	0,325	0,216	0,243
	7.2. Погана	0,516	0,462	0,358	0,400	0,318	0,545
	7.3. Середня	0,226	0,246	0,326	0,175	0,252	0,134
	7.4. Добра	0,129	0,182	0,281	0,100	0,214	0,078
8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю	8.1. Погана	0,233	0,211	0,119	0,361	0,367	0,536
	8.2. Середня	0,533	0,540	0,648	0,444	0,513	0,432
	8.3. Висока	0,233	0,250	0,233	0,194	0,120	0,033

За результатами цього оцінювання можна зробити певні порівняння двох ділянок:

– для ділянки тунелю 5 більшу частину території займає житлова, комерційна, адміністративна забудова, тоді як для тунелю 1 велику частку мають парки і незабудовані території. Відповідно, для ділянки тунелю 5 також суттєво

вище щільність житлової забудови (параметр 2): основна вага припадає на альтернативи «Висока» і «Дуже висока»; для тунелю 1 більша частина ваги для цього параметра припадає на альтернативи «Середня», «Висока»;

– тунель 5 однозначно можна віднести до зони середмістя і такого, що впливає на автомобільні шляхи у середмісті; ділянка тунелю 1 скоріше знаходиться поза середмістям;

– залюдненість в районі ділянки тунелю 5 скоріше від середньої до високої; в районі тунелю 1 – скоріше від низької до середньої;

– інтенсивність автомобільного руху більше на ділянці тунелю 5, в години «пік» швидкість руху при цьому менша порівняно з ділянкою тунелю 1;

– наземна зв’язаність і пропускна здатність автомобільних шляхів краща для ділянки тунелю 1.

На основі оцінок, наведених в табл. 3.10, і побудованої матриці зв’язків був проведений другий етап процедури МММА для оцінювання наслідків впливу структурно-функціональних факторів, оцінювані параметри якого надані в табл. 1.5. Для цього розрахунку також були задіяні дві альтернативні моделі, результати розрахунку наведені в табл. 3.11.

Для зручності далі використовуються усереднені оцінки результатів двох моделей. За результатами оцінювання можна зробити ряд висновків щодо порівняння ділянок потенційного будівництва тунелів:

1) будівництво обох тунелів є доцільним: вага альтернативи «А.1. Доцільний» суттєво перевищує вагу альтернативи «А.2. Недоцільний», причому для тунелю 5 така перевага є абсолютною (відповідно, 0,895 і 0,105 для тунелю 1 і 0,994 і 0,006 для тунелю 5). Це є цілком логічним результатом, оскільки для оцінювання взяті реальні заплановані ділянки, вибір яких є обґрунтованим.

Таблиця 3.11 – Оцінювання наслідків впливу структурно-функціональних параметрів ділянок потенційного будівництва тунелів на екологічно-безпекові фактори

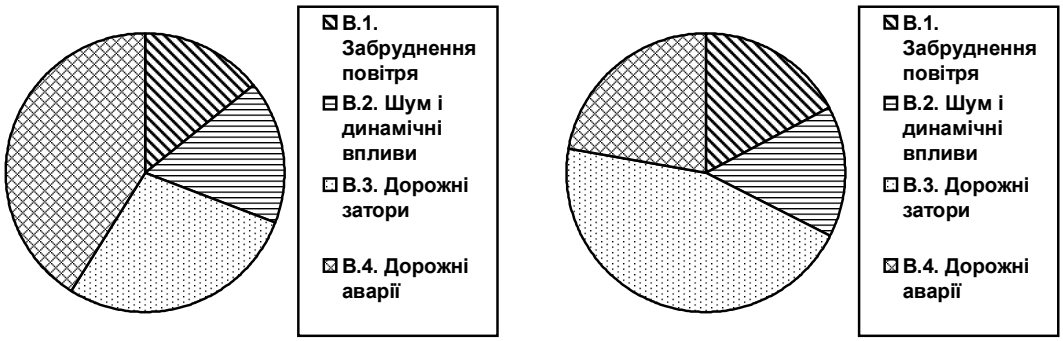
Параметр	Альтернатива	Тунель 1		Тунель 5	
		Експ1	Експ2	Експ1	Експ2
A. Доцільність тунелю	A.1. Доцільний	0,897	0,893	0,988	0,999
	A.2. Недоцільний	0,103	0,107	0,012	0,001
B. Вагомість факторів ризику на ділянці	B.1. Забруднення повітря	0,151	0,134	0,182	0,164
	B.2. Шум і динамічні впливи	0,127	0,205	0,137	0,165
	B.3. Дорожні затори	0,445	0,115	0,527	0,380
	B.4. Дорожні аварії	0,277	0,546	0,154	0,291
C. Вплив побудови тунелю на фактор «Забруднення повітря»	C.1. Не впливає	0,134	0,042	0,033	0,010
	C.2. Частково мінімізує	0,341	0,466	0,291	0,287
	C.3. Помірно мінімізує	0,322	0,300	0,389	0,327
	C.4. Суттєво мінімізує	0,204	0,193	0,287	0,376
D. Вплив побудови тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»	D.1. Не впливає	0,092	0,080	0,091	0,020
	D.2. Частково мінімізує	0,317	0,306	0,295	0,244
	D.3. Помірно мінімізує	0,374	0,349	0,380	0,361
	D.4. Суттєво мінімізує	0,217	0,265	0,233	0,375
E. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні затори»	E.1. Не впливає	0,030	0,185	0,006	0,013
	E.2. Частково мінімізує	0,398	0,486	0,280	0,193
	E.3. Помірно мінімізує	0,395	0,174	0,464	0,339
	E.4. Суттєво мінімізує	0,177	0,154	0,249	0,455
F. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні аварії»	F.1. Не впливає	0,090	0,079	0,038	0,007
	F.2. Частково мінімізує	0,315	0,367	0,315	0,438
	F.3. Помірно мінімізує	0,357	0,339	0,388	0,330
	F.4. Суттєво мінімізує	0,238	0,214	0,259	0,225

2) важливість факторів ризику дещо відрізняється для розглядуваних ділянок, результати розрахунку для параметра «B. Вагомість факторів ризику на ділянці» наведені у вигляді діаграм на рис. 3.2.

Основною відмінністю між ділянками з точки зору важливості факторів ризику є те, що для ділянки 5 значно важливішим є фактор дорожніх заторів, тоді як для ділянки 1 більшу важливість слід приділити фактору дорожніх аварій.

3) обидва потенційні тунелі забезпечують в певній мірі мінімізацію розглядуваних факторів ризику, однак міра цього впливу залежить від конкретного тунелю і типу фактора ризику.

Для всіх розглядуваних факторів ризику» оцінки впливу обох тунелів представлені на рис. 3.3–3.6.



а) б)

Рисунок 3.2 – Діаграми оцінок вагомості факторів ризику для ділянки тунелю 1 (а) і тунелю 5 (б)

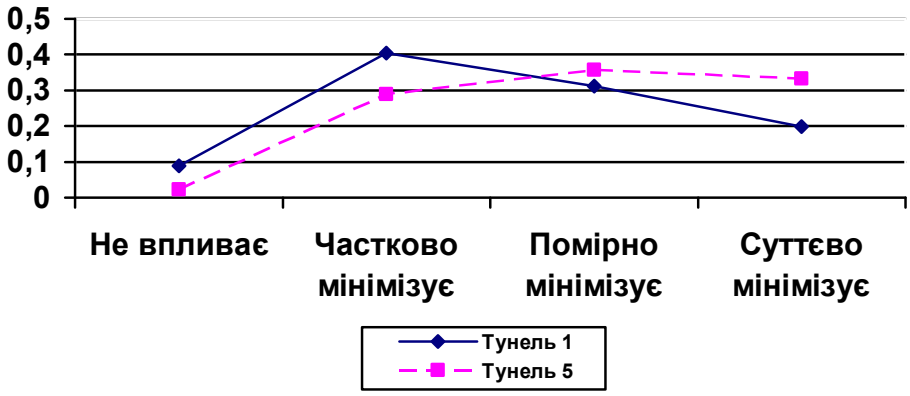


Рисунок 3.3 – Діаграма впливу тунелів на фактор ризику «Р.1. Забруднення повітря»

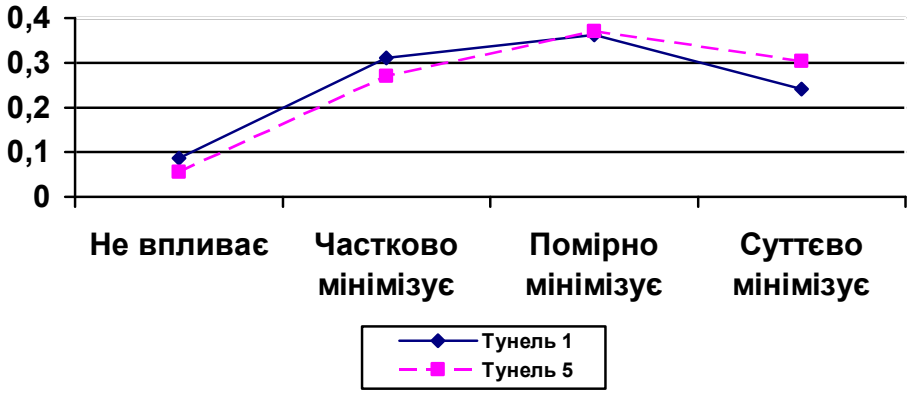


Рисунок 3.4 – Діаграма впливу тунелів на фактор ризику «Р.2. Шум і динамічні впливи»

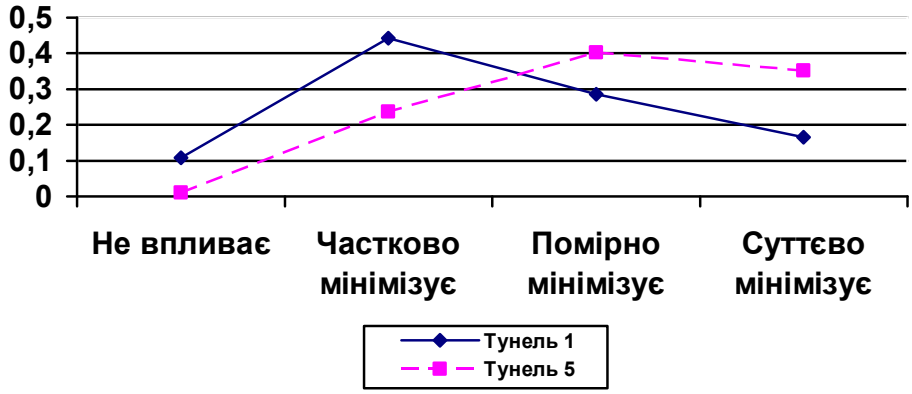


Рисунок 3.5 – Діаграма впливу тунелів на фактор ризику «Р.3. Дорожні затори»

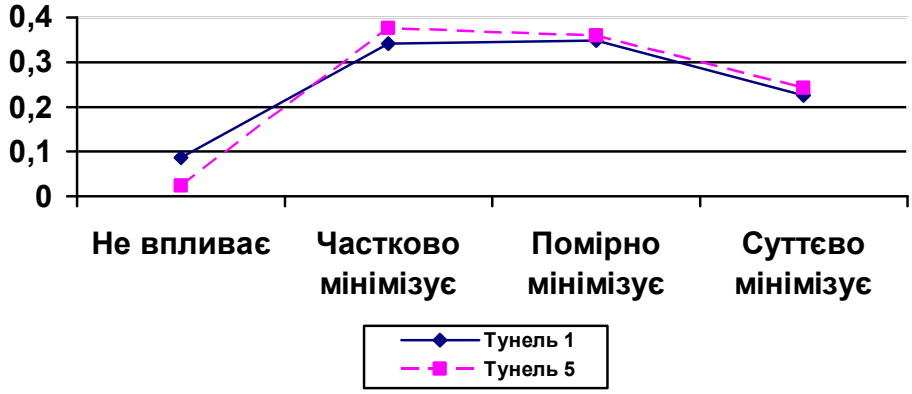


Рисунок 3.6 – Діаграма впливу тунелів на фактор ризику «Р.4. Дорожні аварії»

За рис. 3.3–3.6 і оцінками табл. 3.11 можна зробити висновки і порівняння:

– вага альтернатив «Не впливає» є дуже малою, особливо для тунелю 5. Цей факт також закономірно випливає з високої ваги альтернативи «А.1. Доцільний», яка вже була відмічена раніше;

– в середньому тунель 5 сильніше впливає на мінімізацію факторів ризику. Для факторів «Р.2. Шум і динамічні впливи» і «Р.4. Дорожні аварії» перевага тунелю 5 дуже незначна, в рамках похибки оцінювання, однак для факторів «Р.1. Забруднення повітря» і «Р.3. Дорожні затори» перевага тунелю 5 стає більш очевидною. Якщо за рис. 2.3, 2.5 для тунелю 1 ступінь мінімізації можна

охарактеризувати як «частковий-помірний», то для тунелю 5 більше підходить характеристика «помірний-суттєвий»;

– для порівняння впливу будівництва потенційних тунелів на різні фактори ризику введемо наступний коефіцієнт: $w_{ratio} = (w_{medium} + w_{high}) / (w_{low} + w_{none})$, який відображає відношення суми ваг альтернатив помірного w_{medium} і суттєвого w_{high} впливу будівництва тунелю на мінімізацію відповідного фактору ризику, до суми ваг альтернатив часткового w_{low} і відсутнього w_{none} впливу будівництва тунелю на мінімізацію того ж фактора ризику. Більші значення цього коефіцієнта свідчать про більш значний вплив потенційного будівництва тунелю на відповідний фактор ризику. Розраховані коефіцієнти w_{ratio} для обох ділянок і кожного з факторів ризику наведені у вигляді діаграми на рис. 3.7:

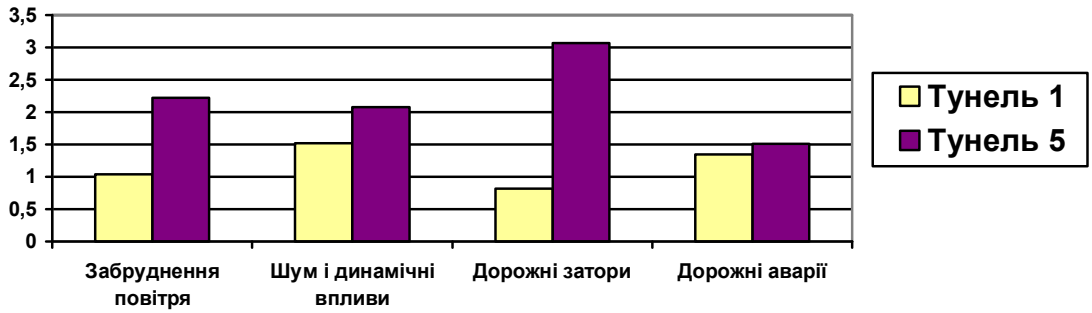


Рисунок 3.7 – Коефіцієнт w_{ratio} ділянок тунелів 1 і 5 для різних факторів ризику

З рис. 3.7 стає очевидним, що тунель 1 найбільш ефективний для мінімізації факторів шуму і дорожніх аварій, а тунель 5 дуже ефективний з точки зору мінімізації фактора дорожніх заторів. Водночас з рисунку стає більш наглядною перевага тунелю 5, яка вже відмічалася раніше.

Слід також зазначити, що високий показник здатності тунелю 5 мінімізувати вплив фактора «Р3. Дорожні затори» є особливо важливим, оскільки цей фактор для відповідної ділянки виявився і найбільш вагомим, як показав проведений вище аналіз ваг альтернатив параметра «В. Вагомість факторів ризику на ділянці».

Розроблена модель оцінювання ділянок потенційного будівництва тунелів дає достатньо адекватні, правдоподібні результати, які є корисними на передпроєктній стадії будівництва для надання підтримки прийняття рішень щодо будівництва. Результати можуть бути представлені в дуже наглядному, зручному для розуміння особами, що приймають рішення, вигляді, що підвищує користь від розробленого інструментарію. Створена модель є універсальною, з її допомогою можуть бути оцінені інші заплановані і потенційні ділянки будівництва тунелів у м. Києві або будь-яких інших великих містах.

В подальшому планується удосконалення моделі за рахунок перегляду і уточнення деяких її параметрів, узгодження оцінок, наданих різними експертами; адаптація моделі до інших типів об’єктів підземної інфраструктури.

3.2 Побудова і оцінювання морфологічної моделі критичної ділянки міської інфраструктури

Для формування повноцінної морфологічної моделі необхідні наступні вхідні оцінки:

- попередні оцінки ймовірностей альтернатив небажаних подій;
- оцінки матриці взаємозв’язків альтернатив параметрів небажаних подій;
- оцінки матриці зв’язків альтернатив параметрів небажаних подій і їх наслідків.

Ці дані отримуються на основі експертного опитування. Для попередніх оцінок ймовірностей альтернатив небажаних подій використовується така форма питання:

Будь ласка, оцініть, наскільки вірогідним є **Тип небажаної події – Вибух**

Неможливо	Дуже низька ймовірність	Низька ймовірність	Ймовірність нижче середньої	Середня ймовірність	Ймовірність вище середньої	Висока ймовірність	Дуже висока ймовірність

Питання щодо матриць взаємозв’язків і зв’язків були поставлені у такій формі:

Як впливає **Тип небажаної події** на **Цілісність об’єкта/його елементів**?

1. Тип небажаної події: 1.1. Вибух									
Чи впливає **1.1. Вибух** на вагу **А.1. Пошкоджень немає або вони мінімальні**	Дуже сильно зменшує	Сильно зменшує	Помірно зменшує	Трохи зменшує	Не впливає	Трохи збільшує	Помірно збільшує	Сильно збільшує	Дуже сильно збільшує
Чи впливає **1.1. Вибух** на вагу **А.2. Пошкодження можуть бути відновлені без обмеження функціональності**	Дуже сильно зменшує	Сильно зменшує	Помірно зменшує	Трохи зменшує	Не впливає	Трохи збільшує	Помірно збільшує	Сильно збільшує	Дуже сильно збільшує
Чи впливає **1.1. Вибух** на вагу **А.3. Пошкодження можуть бути відновлені з обмеженням функціональності**	Дуже сильно зменшує	Сильно зменшує	Помірно зменшує	Трохи зменшує	Не впливає	Трохи збільшує	Помірно збільшує	Сильно збільшує	Дуже сильно збільшує
Чи впливає **1.1. Вибух** на вагу **А.4. Пошкодження невідновні**	Дуже сильно зменшує	Сильно зменшує	Помірно зменшує	Трохи зменшує	Не впливає	Трохи збільшує	Помірно збільшує	Сильно збільшує	Дуже сильно збільшує

Для оцінювання моделі були обрані об’єкти критичної міської інфраструктури, а саме: комплекс трубних і тунельного дюкерів, прокладених по дну Дніпра (див. п. 2.1, рис. 2.1, 2.4).

Вхідні оцінки альтернатив параметрів небажаних подій, а також результати врахування матриці взаємозв’язків процедурою МММА [9] для цих оцінок наведені в табл. 3.12. В стовпчику «Труби» наведені оцінки для трубного дюкера, прокладеного по дну р. Дніпро, в стовпчику «Дюкер» – відповідні оцінки для підземного (тунельного) каналізаційного дюкера.

Таблиця 3.12 – Вхідні нормовані ймовірності небажаних подій і результати врахування матриці взаємозв'язків

Параметр	Альтернатива	Вхідні нормовані оцінки		Оцінки після врахування взаємозв'язків	
		Труби	Дюкер	Труби	Дюкер
1. Тип небажаної події	1.1 Вибух	0,232	0,212	0,440	0,107
	1.2 Пожежа	0,000	0,030	0,000	0,022
	1.3 Зсуви, провали та просідання ґрунту	0,286	0,303	0,198	0,366
	1.4 Погодні катаклізми	0,071	0,030	0,002	0,000
	1.5 Пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту	0,232	0,303	0,247	0,414
	1.6 Порушення функціонування без конструктивних пошкоджень	0,179	0,121	0,113	0,090
2. Походження небажаної події	2.1 Антропогенне зі злим умислом	0,372	0,250	0,550	0,154
	2.2 Антропогенне без злого умислу	0,163	0,036	0,006	0,001
	2.3. Технічне, технологічне	0,302	0,464	0,409	0,631
	2.4 Природне	0,163	0,250	0,035	0,214
3. Масштаб впливу небажаної події	3.1 Окремий структурний або функціональний елемент об'єкта, або окрема обмежена ділянка	0,019	0,500	0,056	0,617
	3.2 Декілька структурних або функціональних елементів об'єкта, або декілька ділянок	0,019	0,313	0,053	0,368
	3.3 Об'єкт повністю	0,302	0,125	0,533	0,015
	3.4 Об'єкт і сусідні до нього	0,302	0,031	0,197	0,000
	3.5 Район міста і більше	0,358	0,031	0,160	0,000

Переведені в числову форму результати експертного оцінювання зв'язків параметрів небажаних подій і їх наслідків наведені в таблицях 3.13, 3.14. Зазначимо, що деякі типи подій не розглядались для відповідних об'єктів, тому в таблицях є незаповнені стовпчики.

Таблиця 3.13 – Матриця зв’язків для трубного дюкера

		1						2				3				
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
А	А.1	-1		-0,8	-0,2	-1	1	-1	-0,8	-0,8	0,5	-0,5	-0,8	-1	-1	-1
	А.2	-1		0,8	0,2	0,5	-1	-1	0,2	0,2	0,8	0,5	0,2	-1	-1	-1
	А.3	0,8		0,5	0,2	1	-1	1	0,5	0,8	0,5	0,8	0,8	0,2	0,2	0,2
	А.4	0,5		-0,8	0,2	0,5	-1	0,8	-0,8	0,8	-0,8	-1	-0,5	1	1	1
Б	Б.1	-1		-0,2	-0,2	-1	-1	-1	-0,8	-0,5	-0,2	-0,8	-1	-1	-1	-1
	Б.2	-0,8		-0,2	-0,2	0,5	0,2	-0,8	-0,5	0,2	0,2	0,2	-0,2	-1	-1	-1
	Б.3	1		0,2	0,2	0,8	0,5	1	0,5	0,5	0,2	0,8	0,8	1	1	1
В	В.1	-1		-0,5	-0,2	-0,8	-0,5	-1	-0,2	-0,5	-0,5	0,5	0,2	-0,8	-1	-1
	В.2	-1		0,8	0,5	0,2	0,5	-0,5	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	-0,2	-0,5	-0,8
	В.3	0,2		0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2
	В.4	1		0,2	0,2	0,8	-0,5	1	-0,2	0,8	0,2	-0,8	-0,2	0,8	1	1
Г	Г.1	-1		-1	-0,5	-1	-0,8	-1	-0,5	-1	-0,2	-0,8	-1	-1	-1	-1
	Г.2	-0,8		-0,8	-0,2	0,2	0,2	-0,5	0,2	-0,2	0,2	-0,5	-0,5	-0,8	-1	-1
	Г.3	0,8		0,2	0,8	0,5	0,5	0,2	0,8	0,5	0,5	0,8	0,5	-0,2	-0,5	-0,8
	Г.4	0,2		0,8	0,2	0,8	0,8	0,8	0,2	1	0,2	0,5	0,8	0,8	0,8	0,5
	Г.5	0,2		-0,8	-0,8	0,2	-0,5	0,8	-0,5	-0,2	-0,5	-0,8	-0,5	0,5	0,8	1
Д	Д.1	0,2		0,8	0,5	0,5	0,8	-0,2	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Д.2	0,2		0,2	0,2	-0,2	-0,2	0,5	-0,5	-0,8	-0,2	-1	-1	-0,8	-1	-1
	Д.3	-1		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	Д.4	-1		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	Д.5	-1		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Е	Е.1	-1		-0,8	-0,5	-1	-0,8	-1	-0,8	-1	-0,5	-0,8	-1	-1	-1	-1
	Е.2	-1		-0,5	-0,2	-0,8	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1	-1
	Е.3	0,2		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1
	Е.4	0,8		0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,5
	Е.5	1		0,8	0,5	1	0,5	1	0,5	0,8	0,5	0,5	0,8	1	1	1
Ж	Ж.1	-1		-0,8	0,2	-0,2	0,2	-1	-0,2	-1	-0,2	-0,2	-0,5	-1	-1	-1
	Ж.2	0,2		1	0,5	0,8	0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	0,8	0,5	-0,2	-0,5	-0,8
	Ж.3	0,8		-0,2	-0,5	0,2	-0,2	0,8	-0,5	0,8	-0,2	0,2	0,5	0,5	0,8	0,5
	Ж.4	1		-0,8	-0,8	-0,5	-0,8	1	-1	0,2	-1	-0,8	-0,5	0,8	1	1
З	З.1	-1		-0,5	-0,5	-1	0,8	-1	-0,5	-1	-0,5	-0,8	-0,8	-1	-1	-1
	З.2	-0,8		0,8	0,5	0,5	0,2	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,2	-0,5	-0,8	-1
	З.3	0,8		0,2	-0,2	0,8	-0,8	0,8	0,2	0,8	-0,2	0,5	1	0,8	1	1
	З.4	1		-0,5	-0,8	0,2	-1	1	-0,8	0,2	-0,8	-0,2	0,8	1	1	1

Таблиця 3.14 – Матриця зв’язків для тунельного дюкера

		1						2				3				
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
А	А.1	-0,2	0,2	-0,5		-0,8	1	-0,5	0,2	-0,5		-0,2	-0,8	-1	-1	-1
	А.2	0,2	0,5	0,5		0,5	-0,8	0,2	0,5	0,5		0,8	0,5	-1	-1	-1
	А.3	0,8	0,2	0,5		0,5	-0,8	0,8	0,2	0,8		0,5	1	0,8	0,5	0,2
	А.4	-0,8	-0,8	-1		-0,8	-0,8	-0,8	-1	-0,8		-1	-0,8	0,5	0,5	0,8
Б	Б.1	-0,2	0,5	0,5		-0,2	-0,8	-0,5	0,2	-0,2		0,5	0,2	-0,5	-1	-1
	Б.2	0,2	0,2	0,5		0,2	0,5	0,8	0,2	0,5		0,5	0,2	-0,2	-0,8	-1
	Б.3	-0,5	-0,8	-0,2		-0,2	-0,2	-0,2	-0,8	-0,2		-0,8	-0,2	0,5	0,8	1
В	В.1	-1	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5	-0,8	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5	-0,8	-0,8	-1
	В.2	-0,5	0,5	0,8		0,5	0,5	0,2	0,5	0,8		0,5	0,2	0,2	-0,2	-0,8
	В.3	0,2	0,2	0,5		0,2	0,2	0,8	0,2	0,2		0,2	0,5	0,5	0,5	0,5
	В.4	-0,5	-0,8	-0,8		-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,5		-0,8	-0,5	-0,2	0,8	1
Г	Г.1	-0,8	-0,5	-0,8		-1	-0,8	-1	-0,2	-0,5		-0,5	-0,8	-0,5	-1	-1
	Г.2	0,8	1	0,5		0,5	0,5	0,5	0,8	0,5		0,8	0,2	-0,8	-1	-1
	Г.3	0,2	0	0,5		0,5	0,8	0,8	0,2	0,8		0,5	0,8	-0,5	-0,5	-0,8
	Г.4	-0,8	-1	-0,5		-0,8	-0,5	-0,2	-0,8	-0,5		-0,8	-0,2	1	0,8	0,5
	Г.5	-1	-1	-1		-0,8	-1	-0,8	-1	-1		-1	-1	-0,2	0,2	0,2
Д	Д.1	0,5	0,2	0,8		0,5	0,8	0,5	1	1		1	1	0,8	0,8	0,8
	Д.2	0,2	0,5	0,2		-0,2	-0,5	-0,2	-0,5	-0,8		-1	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
	Д.3	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1
	Д.4	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1
	Д.5	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1
Е	Е.1	-0,2	-0,2	0,2		-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2		1	0,5	-0,5	-0,8	-1
	Е.2	-0,8	-0,8	-0,8		-0,8	-0,8	-1	-0,8	-0,8		-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-1
	Е.3	-0,8	-0,8	-0,8		-0,8	-0,8	-1	-0,8	-0,8		-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-1
	Е.4	-0,2	0,2	-0,5		-0,5	-0,5	-0,2	-0,5	-0,8		-0,8	-0,5	-0,5	-0,2	-0,5
	Е.5	0,5	0,2	0,5		0,5	0,2	0,5	0,2	0,2		-1	-0,5	0,8	0,8	1
Ж	Ж.1	0,5	0,2	0,8		0,8	1	-0,8	0,8	0,5		1	0,8	-0,8	-1	-1
	Ж.2	0,8	0,5	1		0,8	0,2	1	0,5	1		0,2	0,5	-0,5	-0,5	-0,8
	Ж.3	-0,8	-0,8	-0,8		-0,5	-1	0,5	-0,5	-0,2		-0,5	-0,2	0,5	0,8	1
	Ж.4	-1	-1	-1		-1	-1	-0,5	-1	-0,8		-1	-0,8	0,5	0,8	0,8
З	З.1	0,8	0,8	0,8		0,8	0,8	0,2	0,8	0,5		1	0,8	0,5	0,5	0,2
	З.2	0,2	-0,2	-0,2		-0,2	0,2	0,5	-0,2	-0,2		-0,5	-0,2	0,2	0,2	0,2
	З.3	-0,8	-1	-0,8		-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8		-1	-0,8	-0,5	-0,2	-0,2
	З.4	-1	-1	-1		-1	-1	-1	-1	-1		-1	-1	-0,8	-0,5	-0,5

Використовуючи оцінки, отримані на першому етапі (табл. 1.4), а також оцінки заповнених матриць зв’язків, в результаті проведення розрахункової процедури МММА були отримані результати аналізу наслідків, занесені в підсумкову табл. 3.15.

Таблиця 3.15 – Наслідки небажаних подій з урахуванням можливості появи будь-якої небажаної події

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Труби	Дюкер
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,018	0,051
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,021	0,417
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,544	0,530
	А.4 Пошкодження невідновні	0,416	0,001
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,000	0,269
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,019	0,656
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,981	0,075
В) Можливість передачі функцій іншим об'єктам	В.1 Функції об'єкта можуть бути передані без обмежень	0,005	0,025
	В.2 Функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями	0,100	0,561
	В.3 Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями	0,322	0,401
	В.4 Функції об'єкта не можуть бути передані	0,574	0,014
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,000	0,004
	Г.2 До 7 діб	0,009	0,455
	Г.3 До 1 місяця	0,174	0,524
	Г.4 До 0,5 року	0,570	0,017
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,246	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	0,966	0,992
	Д.2 До 10 осіб	0,034	0,008
	Д.3 10–50 осіб	0,000	0,000
	Д.4 50–200 осіб	0,000	0,000
	Д.5 Більше 200 осіб	0,000	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,000	0,811
	Е.2 До 10 осіб	0,000	0,006
	Е.3 10–100 осіб	0,021	0,006
	Е.4 100–1000 осіб	0,427	0,038
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,551	0,140
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,001	0,464
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,259	0,512
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,431	0,024
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,309	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,000	0,894
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,142	0,105
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території	0,500	0,001
	З.4 Екологічна катастрофа	0,357	0,000

З табл. 3.15 можна зробити ряд порівняльних висновків:

- у цілому тунельний дюкер значно краще протистоїть можливим пошкодженням в результаті впливу всіх небажаних подій. В параметрі А (Цілісність об’єкта/його елементів) для обох об’єктів найбільш імовірною альтернативою є А.3 – «Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності» (вага 0,544 для трубного, 0,530 для тунельного дюкера), однак при цьому другою найбільш вагомою альтернативою для труб є А.4 – «Пошкодження невідновні» (вага 0,416), в той час як для дюкера це альтернатива А.2 – «Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності» (вага 0,417), при цьому вага альтернативи А.4 – «Пошкодження невідновні» близька до нуля. Ще більш демонстративна ситуація з параметром Б (Здатність до функціонування) – для труб вага альтернативи Б.3 – «Об’єкт припиняє функціонування» становить 0,981, що свідчить про дуже низьку стійкість до пошкоджень у разі настання небажаних подій. Для порівняння вага цієї ж альтернативи у тунельного дюкера складає лише 0,075, тобто повністю припинити його функціонування вкрай важко;
- для параметра В (Можливість передачі функцій іншим об’єктам) варто зазначити, що в розглянутому концепті тунельного дюкера передбачається не демонтувати систему трубного дюкера, а залишити її як резервну, тому тунель отримав оцінки альтернатив В.2 – «Функції об’єкта можуть бути передані з певними обмеженнями» зі значенням 0,561 і В.3 – «Функції об’єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями» зі значенням 0,401. Для трубного дюкера найбільші оцінки цього параметра у альтернатив В.4 – «Функції об’єкта не можуть бути передані» зі значенням 0,574 і В.3 – «Функції об’єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями» зі значенням 0,322;

- параметр Г (Час відновлення функціонування) також показує суттєву перевагу тунельного дюкера. Для труб найбільш вагомі альтернативи Г.4 – «До 0,5 року» (вага 0,507) і Г.5 – «Об’єкт не може бути відновлений протягом 1 року» (вага 0,246). Для дюкера результат набагато кращий, його найбільш вагомі альтернативи Г.3 – «До 1 місяця» (0,524) і Г.2 – «До 7 діб» (0,455).
- подібні результати спостерігаються й для параметру Ж (Розмір матеріальних збитків) – для труб ранжування наступне: Ж.3 – «1000–10000 МЗП» (вага 0,431), Ж.4 – «більше 10000 МЗП» (вага 0,309), Ж.2 – «100–1000 МЗП» (вага 0,259), тоді як для тунельного дюкера: Ж.2 – «100–1000 МЗП» (вага 0,512), Ж.1 – «До 100 МЗП» (вага 0,464), тобто в цілому відновлення трубного дюкера потребуватиме приблизно в 10 разів менше ресурсів, що пов’язано з високою конструктивною стійкістю підземної споруди;
- параметр Д (Кількість постраждалих) не є значущим через природу об’єктів, які розглядаються. Безпосередньо постраждалих осіб, ймовірніше за все, не буде в обох випадках (процес транспортування стічних вод – безлюдний). Важливість цього параметра буде проявлятися в дослідженнях інших типів урбаністичних об’єктів;
- результати оцінювання для параметра Е (Порушені умови життєдіяльності) ще раз підтверджує оцінки, отримані для попередніх параметрів – оскільки для труб, ймовірніше за все, функціонування в разі небажаної події буде перервано, відповідно, будуть порушені умови життєдіяльності великої кількості осіб (Е.5 – «Більше 1000 осіб» з вагою 0,551). Для тунельного дюкера найбільш вагомою є альтернатива Е.1 – «Немає» з вагою 0,811. Варто зазначити, що проміжні альтернативи Е.2 – «До 10 осіб», Е.3 – «10–100 осіб» в обох випадках отримали низькі ваги через природу об’єктів, що

розглядаються, оскільки внаслідок виходу з ладу каналізаційної системи кількість осіб, умови життєдіяльності яких порушені, одразу сягають дуже високих значень, що підкреслює критичний (особливо важливий) характер цього елементу інфраструктури міста;

- параметр З (Екологічні наслідки) найбільш наочно демонструє перевагу тунельного дюкера, оскільки для екологічних наслідків небажаних подій значення майже нульові (альтернатива З.1 – «Немає» з вагою 0,894), тоді як для труб в разі небажаних подій виникає З.3 – «Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території» (вага 0,500), або З.4 –«Екологічна катастрофа» (вага 0,357), тобто потенційні екологічні ризики набагато суворіші.

Таким чином, тунельний дюкер переважає майже за всіма розглянутими критеріями трубні дюкери, причому за кількома важливими критеріями – радикально.

3.3 Сценарний аналіз використання підземного простору м. Києва при військових (диверсійних) загрозах, техногенних і природних надзвичайних ситуаціях

Модифікований метод морфологічного аналізу дозволяє проводити прогнозний аналіз «що-якби», обираючи замість всієї можливої множини об’єктів першого етапу дослідження конкретну конфігурацію, або групу конфігурацій, що містять конкретну альтернативу загроз. Ймовірність таких фіксованих альтернатив приймається рівною 1, а ймовірність всіх інших альтернатив того ж параметра – рівною 0. Відповідно, результати другого аналізу відображають можливі наслідки в рамках конкретного сценарію, заданого морфологічною таблицею першого етапу. Таким чином можна промоделювати різні сценарії, порівняти їх між собою, і простежити, наскільки сильно вони відрізняються від загальної картини, коли розглядаються всі можливі варіанти небажаних подій.

В цьому дослідженні взято три сценарії небажаних подій з відповідними конфігураціями морфологічної таблиці першого етапу (трубні та тунельний дюкери):

Сценарій 1 (військово-диверсійна загроза): 1.1 – вибух, 2.1 – умисний, 3.2 – масштаб: декілька ділянок;

Сценарій 2 (техногенна загроза): 1.5 – експлуатаційні пошкодження та/або руйнування конструкцій об’єкту, 2.3 – технічне, технологічне, 3.2 – масштаб: декілька ділянок;

Сценарій 3 (природна загроза): 1.3 – зсуви, провали та просідання ґрунту, 2.3 – технічне, технологічне, 3.3 – об’єкт повністю.

Також розглянуто сценарій 4 – диверсія невизначеного типу, тобто зафіксовано тільки походження події – 2.1, «Антропогенне зі злим умислом», що глибше розкриває сценарії використання підземного простору Києва при військових (диверсійних) загрозах.

Результати моделювання представлені для сценарію 1 представлені в табл. 3.16.

Таблиця 3.16 – Сценарій 1: 1.1 – вибух, 2.1 – умисний, 3.2 – масштаб: декілька ділянок

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Труби	Дюкер
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,000	0,009
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,000	0,247
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,828	0,742
	А.4 Пошкодження невідновні	0,172	0,001
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,000	0,142
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,004	0,764
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,996	0,094
В) Можливість передачі функцій іншим об'єктам	В.1 Функції об'єкта можуть бути передані без обмежень	0,000	0,000
	В.2 Функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями	0,000	0,176
	В.3 Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями	0,403	0,793
	В.4 Функції об'єкта не можуть бути передані	0,597	0,031
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,000	0,000
	Г.2 До 7 діб	0,006	0,447
	Г.3 До 1 місяця	0,392	0,536
	Г.4 До 0,5 року	0,471	0,018
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,131	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	1,000	0,959
	Д.2 До 10 осіб	0,000	0,041
	Д.3 10–50 осіб	0,000	0,000
	Д.4 50–200 осіб	0,000	0,000
	Д.5 Більше 200 осіб	0,000	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,000	0,399
	Е.2 До 10 осіб	0,000	0,000
	Е.3 10–100 осіб	0,052	0,000
	Е.4 100–1000 осіб	0,424	0,133
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,524	0,468
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,000	0,087
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,239	0,874
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,539	0,039
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,222	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,000	0,729
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,009	0,270
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території;	0,470	0,001
	З.4 Екологічна катастрофа	0,522	0,000

Результати зручно порівнювати у вигляді графіків для окремих параметрів. Результати сценарію 1 для параметрів Б, Е, Ж, З наведені на рис. 3.8–3.11.

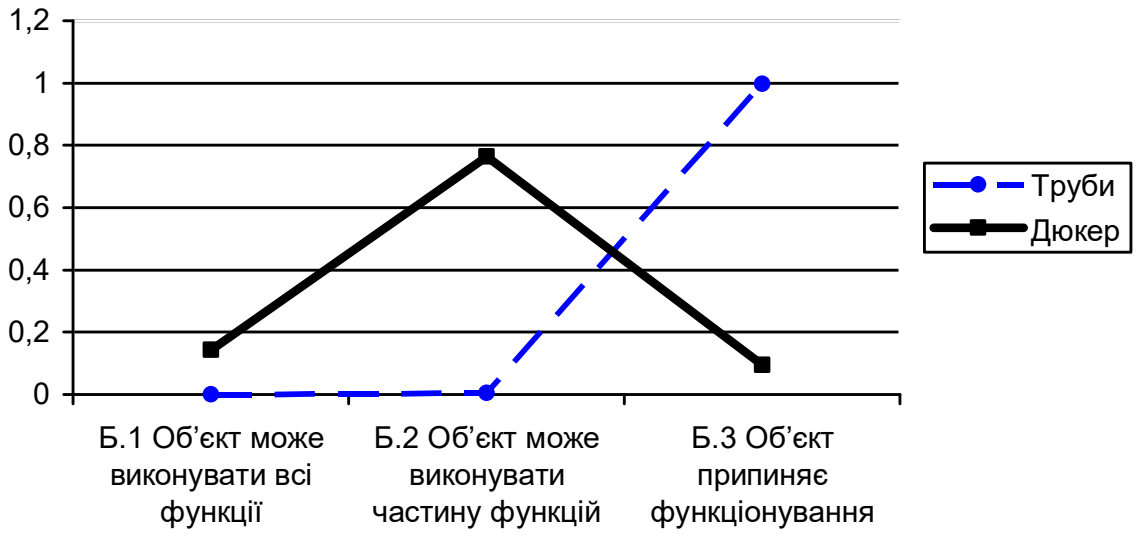


Рисунок 3.8 – Діаграма ваг альтернатив параметра Б – «Здатність до функціонування»

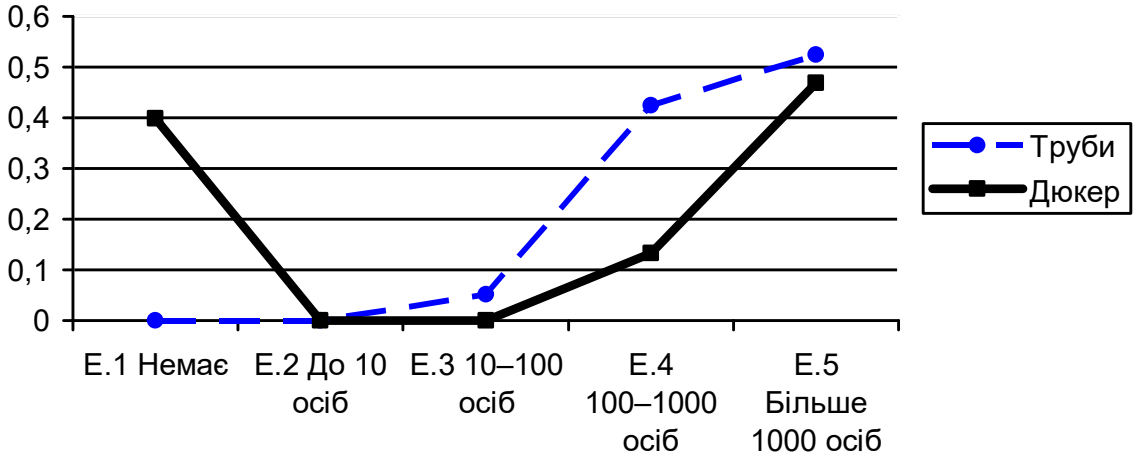


Рисунок 3.9 – Діаграма ваг альтернатив параметра Е – «Порушені умови життєдіяльності»

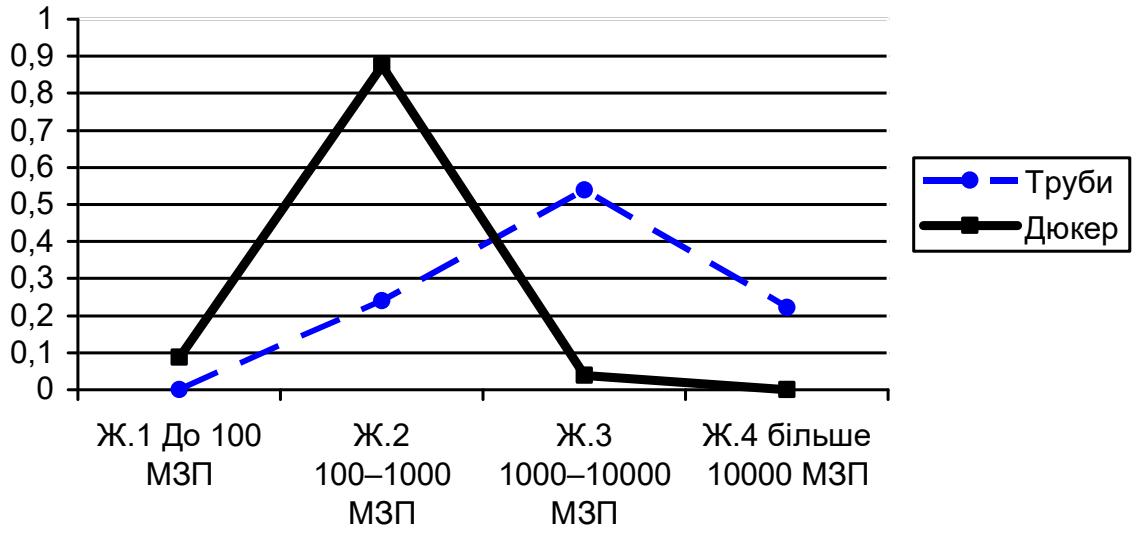


Рисунок 3.10 – Діаграма ваг альтернатив параметра Ж – «Розмір матеріальних збитків»

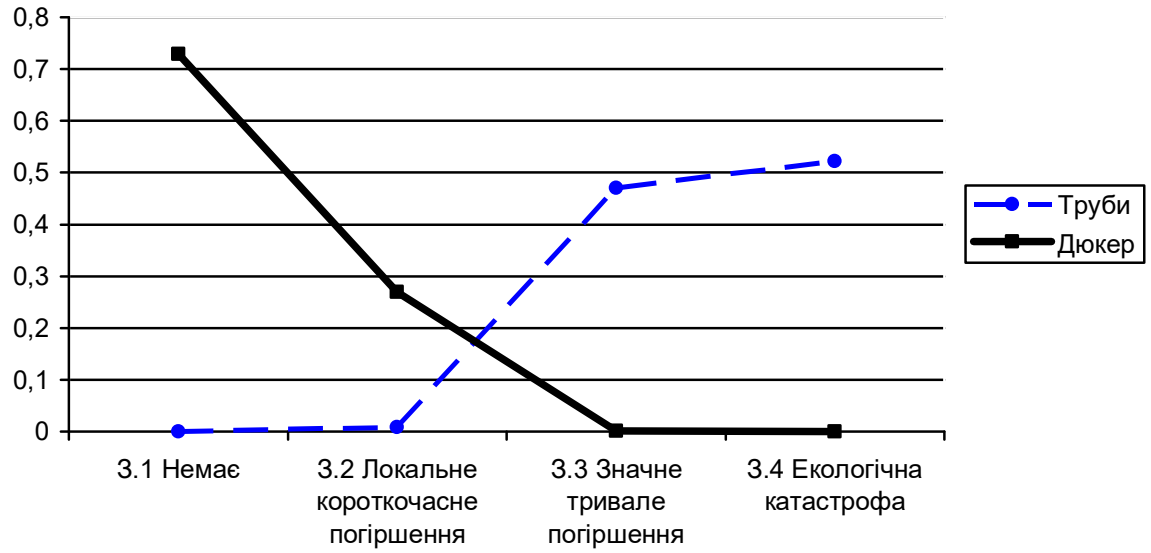


Рисунок 3.11 – Діаграма ваг альтернатив параметра З – «Екологічні наслідки»

Діаграми дозволяють наглядно співвіднести й оцінити ймовірності сценаріїв щодо обраної групи критеріїв для трубного та тунельного дюкерів. Примітно, що прояв найбільш вразливої диверсійної події (вибух) залишає для тунельного дюкера можливість виконувати всі функції (імовірність – 0,142), тоді як для трубного дюкера ймовірність цього дорівнює нулю, так само і можливість

виконувати навіть частину функцій (див. рис. 3.8). При цьому висока ймовірність часткового виконання функцій у разі вибуху (близько 0,8) зберігається тунельним дюкером. Порушення умов життєдіяльності населення – єдиний критерій, де показники обох дюкерів не мають радикальних відмінностей, оскільки в разі припинення функціонування будь-якого дюкера погіршаться умови для великої частини населення Києва (див. рис. 3.9). Майже весь діапазон матеріальних збитків припадає для тунельного дюкера на відносно невеликі витрати до 1 тис. МЗП на ремонт окремої ділянки пошкодженого вибухом кріплення (оправи), гідроізоляції тощо (імовірність 0,87), тоді як для трубного дюкера вибух є повним руйнуванням, а витрати на відновлення ті ліквідацію екологічних наслідків складають до 10 тис. МЗП і більше з сумарною імовірністю 0,76 (див. рис. 3.10). Особливо значимою є діаграма параметра Екологічні наслідки. Прорив каналізаційних стоків у Дніпро може призвести до екологічної катастрофи всього річного басейну, а зупинка функціонування каналізації для багатомільйонного міста є неприпустимою. Як наглядно демонструють графіки, вибух у тунельному дюкері не вплине на екологічну ситуацію (імовірність 0,73), оскільки він знаходиться на десятки метрів нижче річного дна й пошкодження оправи тунелю не вплине на ситуацію. Локальне короткочасне погіршення (імовірність 0,27) може бути пов’язане з випадком потрапляння на підземні води, але воно не має загрозливого характеру. З іншого боку – підривання трубних дюкерів створює екологічну катастрофу (імовірність 0,52), або значне тривале погіршення екологічної ситуації (імовірність 0,47) (див. рис. 3.11).

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. Результати морфологічного моделювання з фіксованим параметром, що відповідають сценаріям 2–4, представлені в табл. 3.17 і на відповідних діаграмах (рис. 3.12–3.15).

Таблиця 3.17 – Результати оцінювання для сценаріїв 2–4

Параметр	Альтернатива	Сценарій 2		Сценарій 3		Сценарій 4	
		Труби	Дюкер	Труби	Дюкер	Труби	Дюкер
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або мінімальні	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,024
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,216	0,383	0,000	0,000	0,000	0,328
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,649	0,613	0,832	1,000	0,505	0,647
	А.4 Пошкодження невідновні	0,135	0,001	0,168	0,000	0,495	0,000
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,000	0,223	0,000	0,179	0,000	0,152
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,229	0,628	0,000	0,536	0,001	0,792
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,771	0,149	1,000	0,286	0,999	0,056
В) Можливість передачі функцій іншим об'єктам	В.1 Функції об'єкта можуть бути передані без обмежень	0,016	0,022	0,005	0,007	0,000	0,003
	В.2 Функції об'єкта можуть бути передані з певними обмеженнями	0,285	0,573	0,181	0,579	0,012	0,294
	В.3 Функції об'єкта можуть бути передані з суттєвими обмеженнями	0,357	0,382	0,380	0,402	0,274	0,685
	В.4 Функції об'єкта не можуть бути передані	0,342	0,022	0,434	0,012	0,714	0,018
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000
	Г.2 До 7 діб	0,044	0,353	0,004	0,191	0,002	0,516
	Г.3 До 1 місяця	0,312	0,636	0,179	0,574	0,143	0,474
	Г.4 До 0,5 року	0,599	0,010	0,782	0,213	0,469	0,010
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,044	0,000	0,036	0,000	0,386	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	1,000	0,995	0,973	0,993	0,942	0,985
	Д.2 До 10 осіб	0,000	0,005	0,027	0,007	0,058	0,015
	Д.3 10–50 осіб	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Д.4 50–200 осіб	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Д.5 Більше 200 осіб	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,000	0,599	0,000	0,179	0,000	0,712
	Е.2 До 10 осіб	0,001	0,003	0,000	0,002	0,000	0,000
	Е.3 10–100 осіб	0,055	0,003	0,023	0,002	0,013	0,000
	Е.4 100–1000 осіб	0,447	0,021	0,459	0,012	0,407	0,100
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,497	0,374	0,518	0,805	0,580	0,188
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,000	0,459	0,000	0,194	0,000	0,108
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,534	0,510	0,483	0,719	0,111	0,844
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,427	0,030	0,427	0,086	0,410	0,047
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,040	0,000	0,090	0,000	0,479	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,000	0,903	0,000	0,837	0,000	0,805
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,229	0,095	0,203	0,159	0,011	0,194
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території;	0,550	0,001	0,600	0,004	0,470	0,001
	З.4 Екологічна катастрофа	0,220	0,000	0,197	0,000	0,519	0,000

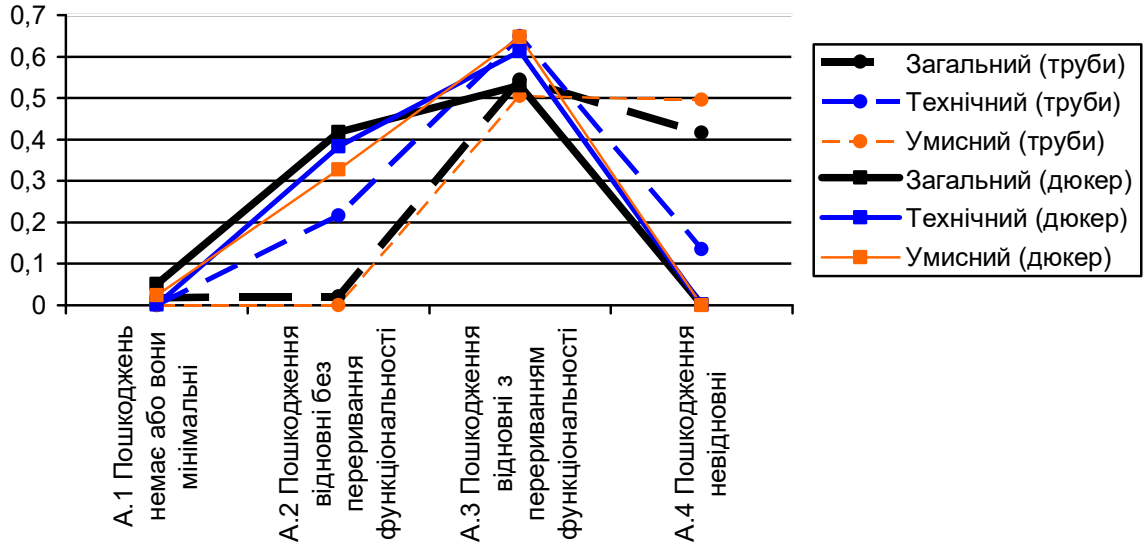


Рисунок 3.12 – Діаграма ваг альтернатив параметра А – «Цілісність об’єкта/його елементів»

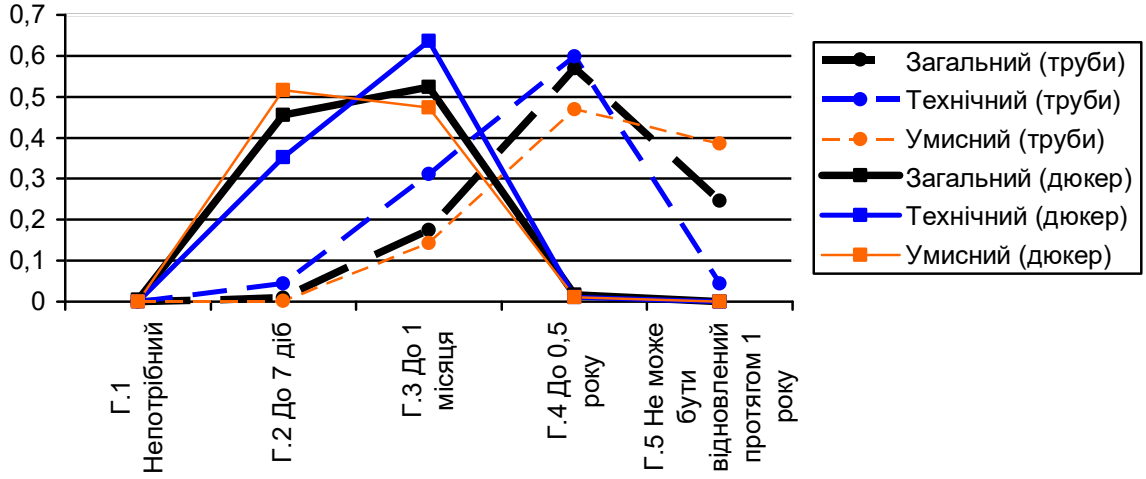


Рисунок 3.13 – Діаграма ваг альтернатив параметра Г – «Час відновлення функціонування»

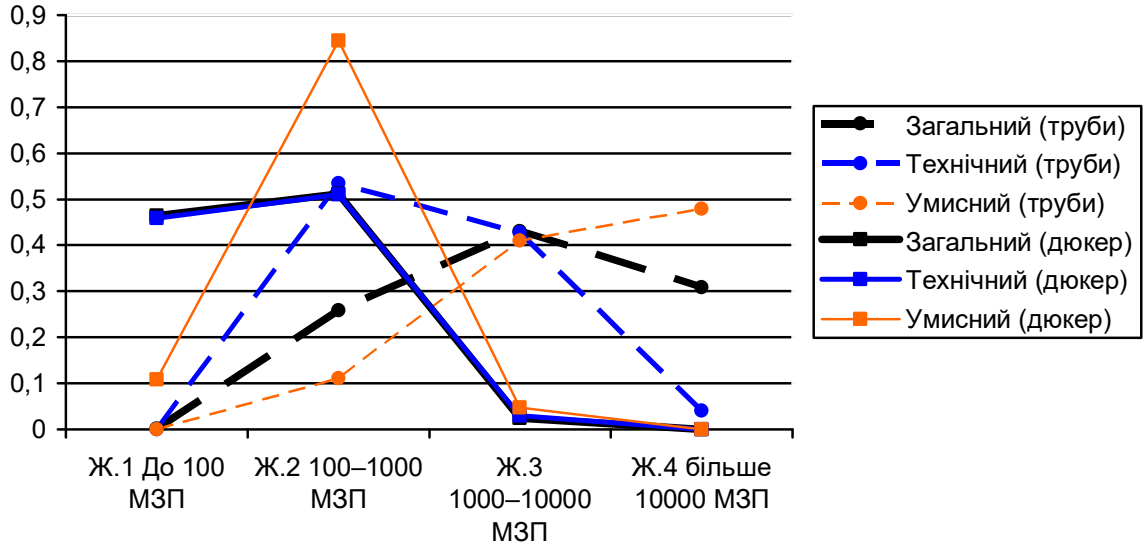


Рисунок 3.14 – Діаграма ваг альтернатив параметра Ж – «Розмір матеріальних збитків»

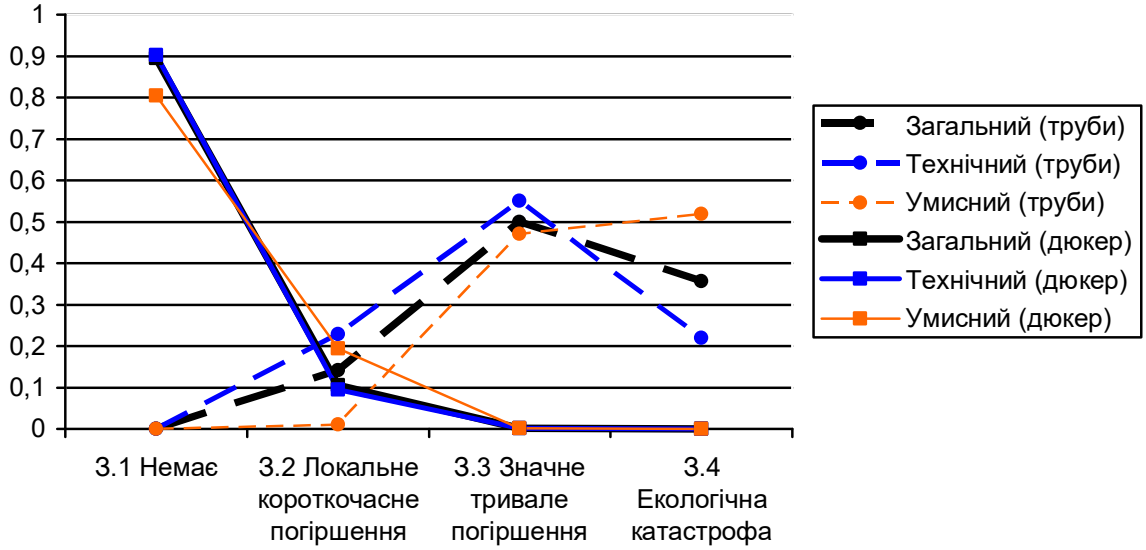


Рисунок 3.15 – Діаграма ваг альтернатив параметра З – «Екологічні наслідки»

Графіки на рис. 3.12–3.15 ще раз наочно демонструють перевагу дюкера, відображену результатами моделювання, причому ця перевага спостерігається в будь-яких сценаріях. В порівнянні сценаріїв можна відмітити, що умисно створені небажані події (диверсії, терористичні акти) в цілому можуть викликати більш

суворі наслідки і завдати більших збитків, ніж природні та техногенні небажані події. Отримана методика та інструментарій модифікованого морфологічного аналізу можуть бути застосовані для порівняння будь-яких інших об’єктів інфраструктури й закладають основи системної стратегії розвитку міського підземного простору з метою мінімізації військових, техногенних і природних загроз.

3.4 Імпульсне когнітивне моделювання планування раціональних конфігурацій підземного простору в умовах екологічних і техногенних ризиків великих міст

Метою імпульсного когнітивного моделювання планування раціональних конфігурацій підземного простору в умовах екологічних і техногенних ризиків великих міст є побудова сценаріїв щодо планування побудови запропонованого авторами тунельного дюкеру під Дніпром для перепуску стічних вод з правобережного Києва до Бортницької станції аерації та обгрутування доцільості його побудови з порівнянням існуючих трубних дюкерів. При цьому в якості збурюючих факторів враховуються можливі дії небажаних подій, які потенційно можуть вплинути на підземний урбаністичний об’єкт або клас об’єктів. Як показано в п. 2.3 цього звіту, 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).

Згідно з розробленою стратегією реалізації системного підходу, наведеного у п. 1.1, результати, що отримані на етапі передбачення з застосуванням методу морфологічного аналізу, використовуються як вихідна інформація для знаходження шляхів побудови альтернативи того чи іншого сценарію у вигляді когнітивної карти. Результатом цього моделювання є аналіз наслідків події для об’єкта дослідження при динамічних навантаженнях, можливість порівняти різні об’єкти з точки зору стійкості та здатності протистояти різнорідним небажаним

подіям в динаміці процесу і запропонувати науково обґрунтовану стратегію реалізації пріоритетного сценарію.

Будемо проводити всі кроки когнітивного моделювання поступово, згідно з наведеною процедурою у п. 1.8.

Перший етап. Розробка когнітивної моделі. При розробці когнітивної моделі враховується, що розробка структури когнітивних моделей є одним з найважливіших етапів дослідження соціально-економічних систем. Вивчення структури важливо для виявлення закономірностей існування і розвитку систем, виявлення таких особливостей і недоліків досліджуваних структур, які вимагають підвищеної уваги та знань не лише дослідника, а й особи, що приймає рішення в реальній складній системі. При розробці когнітивної моделі зручно представляти проаналізовану і систематизовану інформацію, отриману в пп. 1.2–1.5, у вигляді вершин когнітивної карти. У таблиці 3.18 наведено вершини (концепти) моделі когнітивної карти системи «Трубні дюкери».

Когнітивна карта системи «Трубні дюкери» наведена на рис. 3.16.

На наступному етапі проводимо аналіз циклів когнітивної карти G1, який показав, що в цій системі міститься 4 цикла, серед них – 1 цикл позитивного (підсилюючого) і 3 цикли негативного (стабілізуючого) зворотнього зв'язку. Це свідчить про те, що аналізована система структурно стійка. На рис. 3.17 наведено цикли моделі G1 та аналіз чисельної стійкості.

Таблиця 3.18 – Вершини когнітивної карти G1 системи «Трубні дюкери»

Код	Найменування вершини	Код	Наслідки	Призначення вершини
V1	Система «Трубні дюкери»			Індикативна
V2	Події антропогенного походження	V2.1	Зі злим умислом: бойові дії, диверсії, тероризм	Збурючі
		V2.2	Без злого умислу: помилки, недбалість, недотримання норм будівництва або експлуатації	
V3	Події техногенного походження		Технічні і технологічні (технічні відмови, поломки, руйнування за рахунок технологічних факторів, корозії і т.д.)	Збурючі
V4	Природні катастрофи, погодні катаклізми	V4.1	Природні катастрофи, погодні катаклізми (атмосферні, гідросферні і літосферні збурення).	Збурючі
		V4.1.1	Зсуви, провали, просідання грунту	
V5	Охорона об’єкта			Базова
V6	Аварійний стан дюкерів		Абразивний знос, руйнування через промоїни під трубами і зовнішніх напружень зношеного матеріалу	Регулюючі
V7	Масштаб впливу небажаної події	V7.1	Структурний, або окрема ділянка	Регулюючі
		V7.2	Функціональний елемент об’єкта, або декілька ділянок	
		V7.3	Об’єкт повністю зруйновано	
		V7.4	Район міста і більш	
V8	Здатність до функціонування	V8.1	Об’єкт може виконувати всі функції	Регулюючі
		V8.2	Об’єкт припиняє функціонування	
V9	Час відновлення функціонування		Скільки часу знадобиться для відновлення об’єкта після впливу небажаної події	Регулюючі
V10	Екологічні наслідки		Потенційні ризики для екологічної ситуації	Регулюючі
V11	Економічні наслідки		Очікувані економічні наслідки в разі настання небажаної події	Регулюючі
V12	Наслідки для життєдіяльності		Приблизна кількість осіб, умови життєдіяльності яких можуть бути порушені в разі настання небажаної події	Регулюючі
V12-1	Кількість постраждалих		Приблизна кількість осіб, які можуть постраждати в разі настання небажаної події	Регулюючі
V13	Економічні ресурси		Очікувані економічні збитки в разі настання небажаної події	Управляюча
V14	Організаційні, технічні та ін. ресурси		Очікувані ресурси в разі настання небажаної події	Управляюча
V15	Інвестор			Базова
V16	Цілісність системи руйнування		Наскільки сильні пошкодження отримав об’єкт в результаті впливу небажаної події	Регулюючі
V17	Матеріальний збиток (мінімальні розміри з/п)		Очікуваний розмір збитків в разі настання небажаної події на об’єкті	Регулюючі

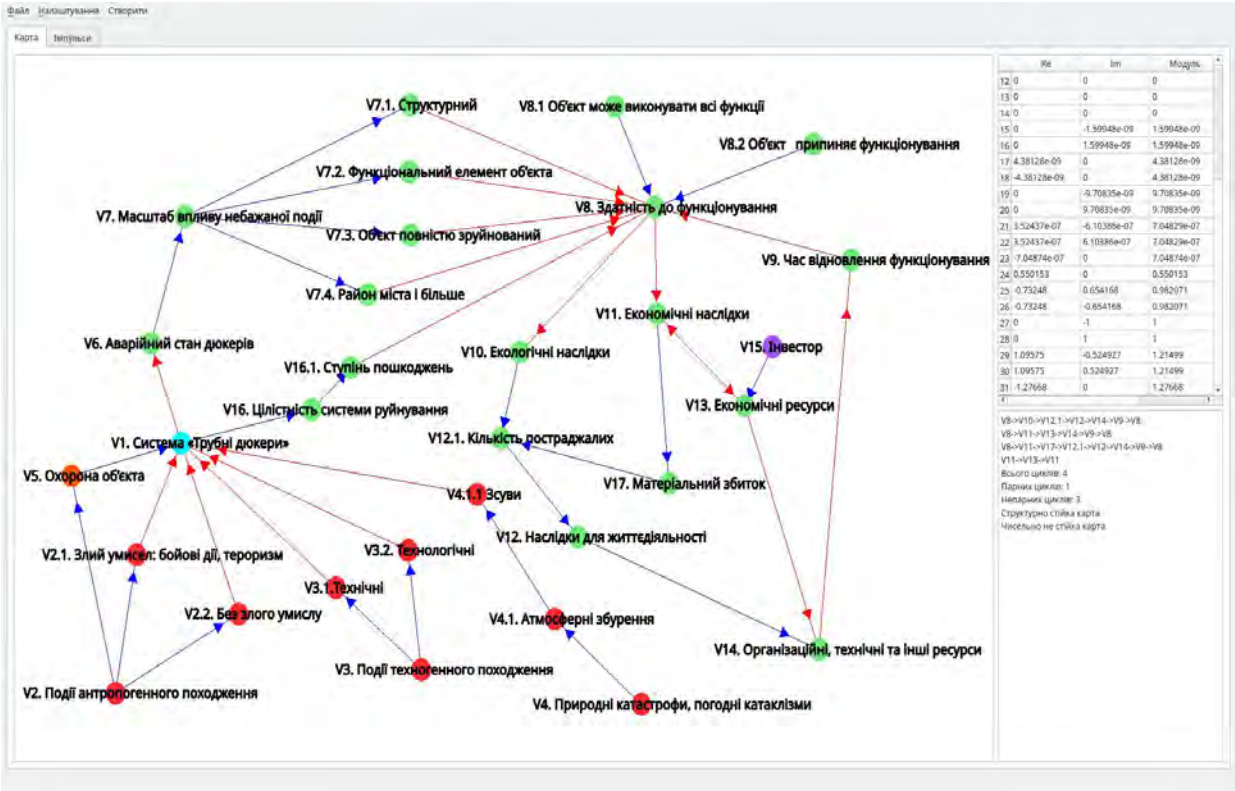


Рисунок 3.16 – Когнітивна карта G1 системи «Трубні дюкери»

	Re	Im	Модуль
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	-1.59948e-09	1.59948e-09
16	0	1.59948e-09	1.59948e-09
17	4.38128e-09	0	4.38128e-09
18	-4.38128e-09	0	4.38128e-09
19	0	-9.70835e-09	9.70835e-09
20	0	9.70835e-09	9.70835e-09
21	3.52437e-07	-6.10386e-07	7.04829e-07
22	3.52437e-07	6.10386e-07	7.04829e-07
23	-7.04874e-07	0	7.04874e-07
24	0.550153	0	0.550153
25	-0.73248	0.654168	0.982071
26	-0.73248	-0.654168	0.982071
27	0	-1	1
28	0	1	1
29	1.09575	-0.524927	1.21499
30	1.09575	0.524927	1.21499
31	-1.27668	0	1.27668

Рисунок 3.17 – Розрахунок власних чисел матриці відношень G1

Наведений розрахунок власних чисел матриці відношень G1 свідчить, що система чисельно не стійка: |M|=1,27>1.

На третьому етапі когнітивного моделювання для визначення можливого розвитку процесів в складній системі і розробки сценаріїв розвитку була використана модель імпульсного процесу (моделювання розповсюдження збурень на когнітивних моделях) [79, 80]:

$$x_{v_i}(n+1) = x_{v_i}(n) + \sum_{v_j : e = e_{ij} \in E}^{k-1} f(x_i, x_j, e_{ij}) P_j(n) + Q_{vi}(n).$$

Тут *x(n), x(n+1)* – величини показника у вершині *Vi* при кроках імітації в момент *t = n* і наступним за ним *t = n+1; Pj(n)* – імпульс, який був у вершині *Vj* в момент *t = n; QVi (n) = {q1,q2,...,qk}* – вектор зовнішніх імпульсів (збурюючих або керуючих впливів), внесених у вершини *Vi* в момент часу *n*.

Проведемо імпульсне когнітивне моделювання для побудованої когнітивної карти G1 системи «Трубні дюкери».

Сценарій №1. Когнітивна карта G1 піддається антропогенним загрозам (злий умисел), збурюючий імпульс q2.1 = +1 надходить до вершини V2.1.

Результати обчислювального експерименту наведені на рис. 3.18 на 10 кроках моделювання і зображені на графіках рис. 3.19. Карта чисельно не стійка.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V1. Система «Трубні дюкери»	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V2. Події антропогенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.1. Злий умисел: бойові дії, тероризм	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V2.2. Без злого умислу	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3. Події техногенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3.1.Технічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3.2. Технологічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4. Природні катастрофи, погодні катаклізми	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1. Атмосферні збурення	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1.1 Зсуви	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V5. Охорона об'єкта	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V6. Аварійний стан дюкерів	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
V7. Масштаб впливу небажаної події	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
V7.1. Структурний	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.2. Функціональний елемент об'єкта	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.3. Об'єкт повністю зруйнований	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.4. Район міста і більше	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V8. Здатність до функціонування	0	0	0	0	0	1	-3	-3	-3	-3	-4
V8.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8.2 Об'єкт припинив функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V9. Час відновлення функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-2
V10. Екологічні наслідки	0	0	0	0	0	0	-1	3	3	3	3
V11. Економічні наслідки	0	0	0	0	0	0	-1	3	2	6	5
V12. Наслідки для життєдіяльності	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	6
V12.1. Кількість постраждалих	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	6	5
V13. Економічні ресурси	0	0	0	0	0	0	0	1	-3	-2	-6
V14. Організаційні, технічні та інші ресурси	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	4
V15. Інвестор	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V16. Цілістність системи руйнування	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V16.1. Ступінь пошкоджень	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V17. Матеріальний збиток	0	0	0	0	0	0	0	-1	3	2	6

Рисунок 3.18 – Результати обчислювального експерименту. Сценарій №1

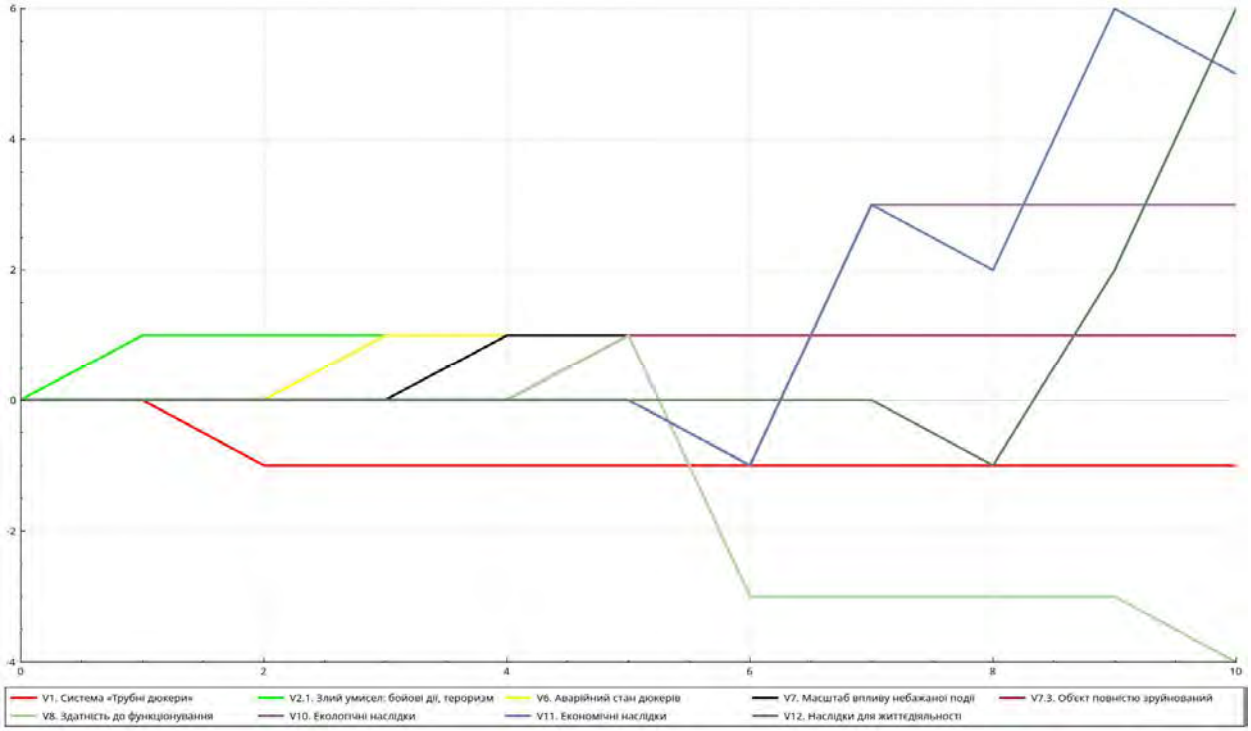


Рисунок 3.19 – Розподіл імпульсних процесів у вершинах V1,V2.1, V7, V12, V10, V11 системи «Трубні дюкери» під дією антропогенних загроз (злий умисел). Сценарій №1

Сценарій №2. Нехай система знаходиться під впливом природних катаклізмів (зсуви): збурюючий імпульс $q_{4.1.1}$=+1 надходить до вершини V4.1.1.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V1. Система «Трубні дюкери»	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V2. Події антропогенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.1. Злий умисел: бойові дії, тероризм	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.2. Без злого умислу	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3. Події техногенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3.1.Технічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3.2. Технологічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4. Природні катастрофи, погодні катаклізми	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1. Атмосферні збурення	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1.1 Зсуви	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V5. Охорона об'єкта	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V6. Аварійний стан дюкерів	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
V7. Масштаб впливу небажаної події	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
V7.1. Структурний	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.2. Функціональний елемент об'єкта	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.3. Об'єкт повністю зруйнований	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.4. Район міста і більше	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V8. Здатність до функціонування	0	0	0	0	0	1	-3	-3	-3	-3	-4
V8.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8.2 Об'єкт припиняє функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V9. Час відновлення функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-2
V10. Екологічні наслідки	0	0	0	0	0	0	-1	3	3	3	3
V11. Економічні наслідки	0	0	0	0	0	0	-1	3	2	6	5
V12. Наслідки для життєдіяльності	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	6
V12.1. Кількість постраждалих	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	6	5
V13. Економічні ресурси	0	0	0	0	0	0	0	1	-3	-2	-6
V14. Організаційні, технічні та інші ресурси	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	4
V15. Інвестор	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V16. Цілісність системи руйнування	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V16.1. Ступінь пошкоджень	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V17. Матеріальний збиток	0	0	0	0	0	0	0	-1	3	2	6

Рисунок 3.20 – Результати обчислювального експерименту. Сценарій №2

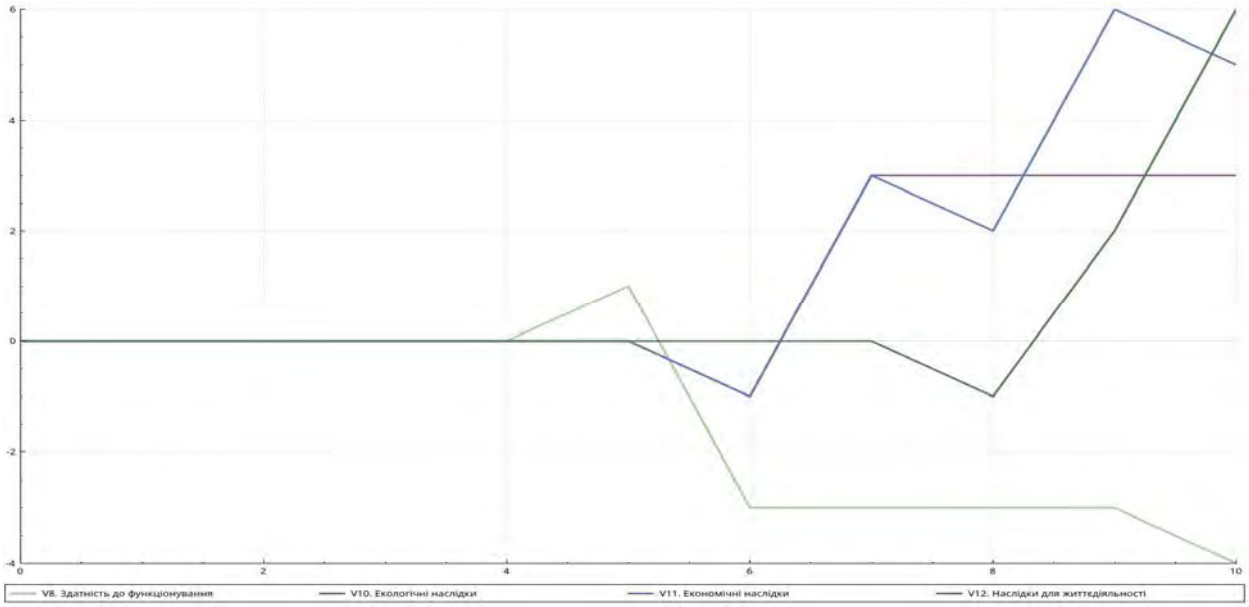


Рисунок 3.21 – Розподіл більш суттєвих факторів, а саме: здатності до функціонування V8, наслідків життєдіяльності V12, екологічних V10 та економічних V11 наслідків системи «Трубні дюкери» під впливом екологічних факторів (зсуви). Сценарій №2

З наведених результатів моделювання (Сценарій 1 та Сценарій 2), маємо практично однаковий розподіл результатів для V2.1 «злого умислу» та V4.1.1. «зсувів», що пояснюється тим, що когнітивна карта G1 чисельно не стійка. З метою досягнення чисельної стійкості, врахуємо значення зв'язків між деякими вершинами когнітивної карти, а саме:

1) $V2.2. \text{->} \ V1 = -0.6$

2) $V4.1.1. \text{->} \ V1 = -0.6$

3) $V7.1. \text{->} \ V8 = -0.1$

4) $V7.2. \text{->} \ V8 = -0.3$

5) $V7.3. \text{->} \ V8 = -0.9$

6) $V8. \text{->} \ V10 = -0.5$

7) $V13. \text{->} \ V11 = -0.7$

9) $V17. \text{->} \ V12.1 = 0.1$

В результаті отримуємо структурно та чисельно стійку когнітивну карту G1, що наведена на рис. 3.22.

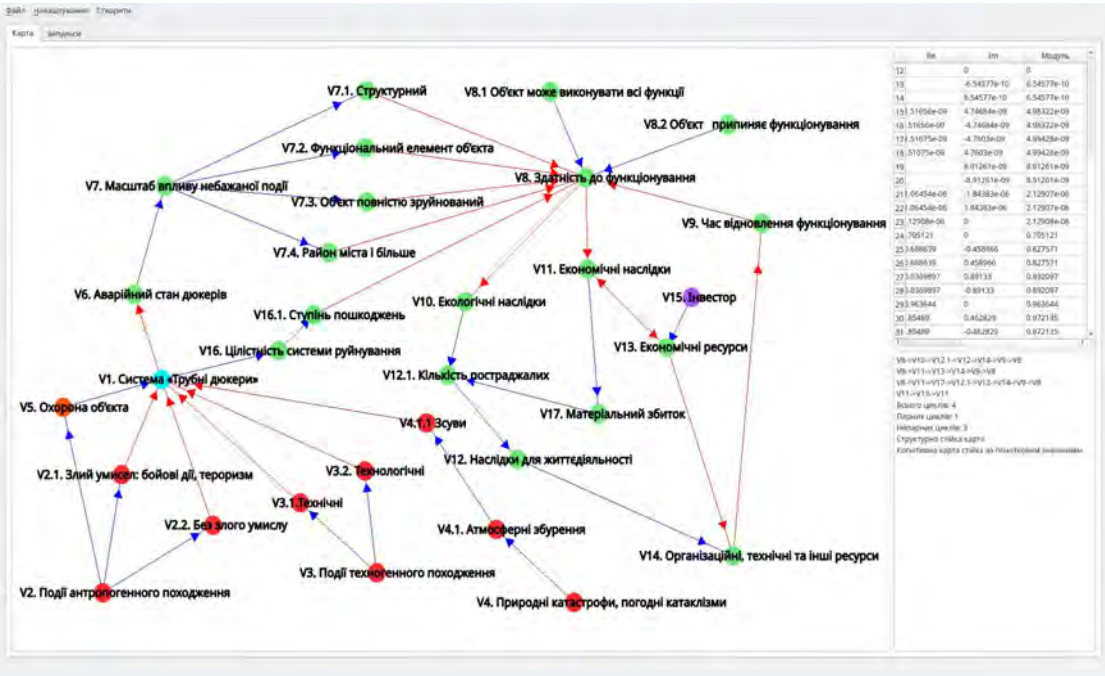


Рисунок 3.22 – Когнітивна карта G1 системи «Трубні дюкери», стійка структурно та чисельно

Проведемо аналогічно Сценаріям 1 та 2 когнітивне імпульсне моделювання, але для чисельно і струтурно стійкої карти G1.

Сценарій №3. Нехай система знаходиться під впливом антропогенних факторів (злий умисел); збурюючий імпульс $q_{2.1}$=+1 надходить до вершини V2.1.

Результати обчислювального експерименту Сценарію №3 наведено на рис. 3.23 та рис. 3.24.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V1. Система «Трубні дюкери»	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V2. Події антропогенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.1. Злий умисел: бойові дії, тероризм	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V2.2. Без злого умислу	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3. Події техногенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3.1.Технічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3.2. Технологічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4. Природні катастрофи, погодні катаклізми	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1. Атмосферні збурення	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1.1 Зсуви	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V5. Окорона об'єкта	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V6. Аварійний стан дюкерів	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
V7. Масштаб впливу небажаної події	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
V7.1. Структурний	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.2. Функціональний елемент об'єкта	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.3. Об'єкт повністю зруйнований	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V7.4. Район міста і більше	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
V8. Здатність до функціонування	0	0	0	0	0	1	-1.3	-1,3	-1.3	-1.3	-1.6
V8.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8.2 Об'єкт припиняє функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V9. Час відновлення функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.11
V10. Екологічні наслідки	0	0	0	0	0	0	-0.5	0.65	0.65	0.65	0.65
V11. Економічні наслідки	0	0	0	0	0	0	-0.3	0.39	0.18	0.663	0.516
V12. Наслідки для життєдіяльності	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	0.62	0.689
V12.1. Кількість постраждалих	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	0.62	0.689	0.668
V13. Економічні ресурси	0	0	0	0	0	0	0	0.3	-0.39	-0.18	-0.663
V14. Організаційні, технічні та інші ресурси	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3	-0.11	0.8
V15. Інвестор	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V16. Цілістність системи руйнування	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V16.1. Ступінь пошкоджень	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V17. Матеріальний збиток	0	0	0	0	0	0	0	-0.3	0.39	0.18	0.663

Рисунок 3.23 – Результати обчислювального експерименту. Сценарій №3

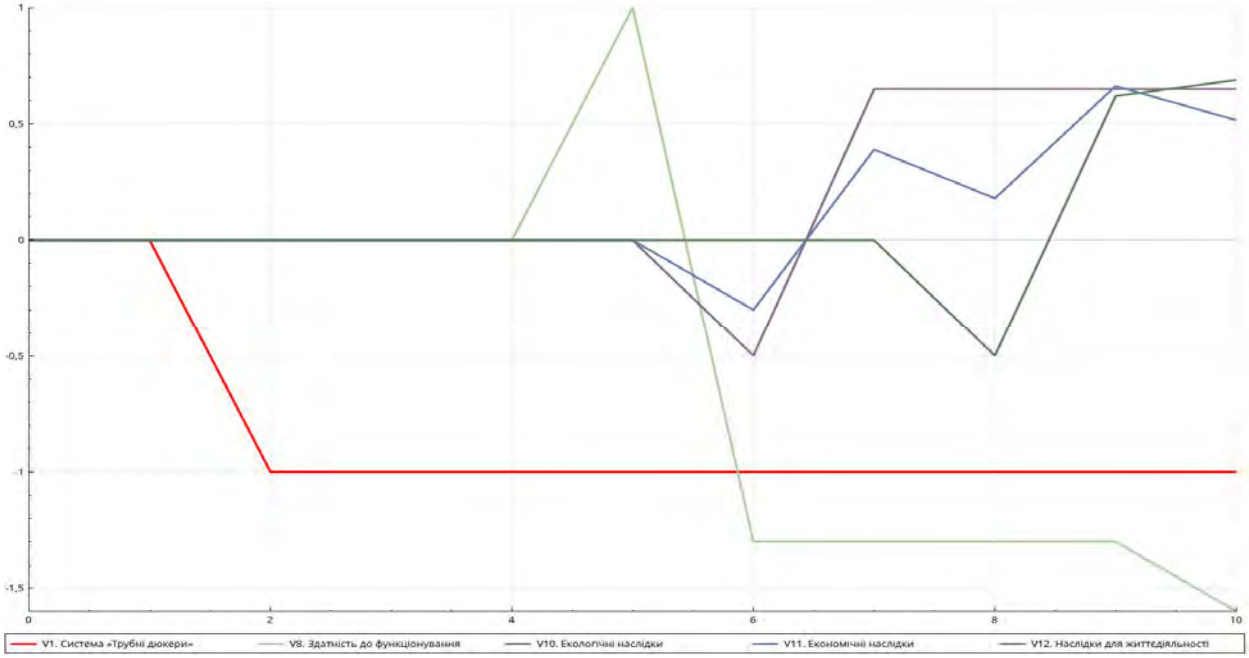


Рисунок 3.24 – Розподіл факторів: наслідки для життєдіяльності V12, екологічні v10 та економічні V11 наслідки, здатності до функціонування V8 системи трубних дюкерів під впливом антропогенних факторів (злий умисел)

З наведених розрахунків можна зробити висновок, що врахування причинно-слідкових значень зв'язків вершин призводить до більш достовірних результатів, що обумовлює необхідність приведення когнітивної карти до чисельної і структурної стійкості. Бачимо, що в результаті дії злого умислу суттєво зменшується здатність до функціонування трубних дюкерів, зростають наслідки життєдіяльності, а також екологічні та економічні наслідки.

Сценарій №4. Нехай система знаходиться під впливом екологічних факторів (зсуви), збурюючий імпульс $q_{4\text{-}1.1}$=+1 надходить до вершини V4.1.1.

Результати обчислювального експерименту Сценарію №4 наведено на рис. 3.32 та рис. 3.33.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V1. Система «Трубні дюкери»	0	0	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
V2. Події антропогенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.1. Злий умисел: бойові дії, тероризм	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.2. Без злого умислу	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3. Події техногенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3.1.Технічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3.2. Технологічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4. Природні катастрофи, погодні катаклізми	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1. Атмосферні збурення	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1.1 Зсуви	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V5. Охорона об'єкта	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V6. Аварійний стан дюкерів	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
V7. Масштаб впливу небажаної події	0	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
V7.1. Структурний	0	0	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
V7.2. Функціональний елемент об'єкта	0	0	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
V7.3. Об'єкт повністю зруйнований	0	0	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
V7.4. Район міста і більше	0	0	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
V8. Здатність до функціонування	0	0	0	0	0	0.6	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.96
V8.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8.2 Об'єкт припиняє функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V9. Час відновлення функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18	0.066
V10. Екологічні наслідки	0	0	0	0	0	0	-0.3	0.39	0.39	0.39	0.39
V11. Економічні наслідки	0	0	0	0	0	0	-0.18	0.234	0.108	0.3978	0.3096
V12. Наслідки для життєдіяльності	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3	0.372	0.4134
V12.1. Кількість постраждалих	0	0	0	0	0	0	0	-0.3	0.372	0.4134	0.4008
V13. Економічні ресурси	0	0	0	0	0	0	0	0.18	-0.234	-0.108	-0.3978
V14. Організаційні, технічні та інші ресурси	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.18	-0.066	0.48
V15. Інвестор	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V16. Цілістність системи руйнування	0	0	0	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
V16.1. Ступінь пошкоджень	0	0	0	0	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
V17. Матеріальний збиток	0	0	0	0	0	0	0	-0.18	0.234	0.108	0.3978

Рисунок 3.25 – Результати обчислювального експерименту. Сценарій №4

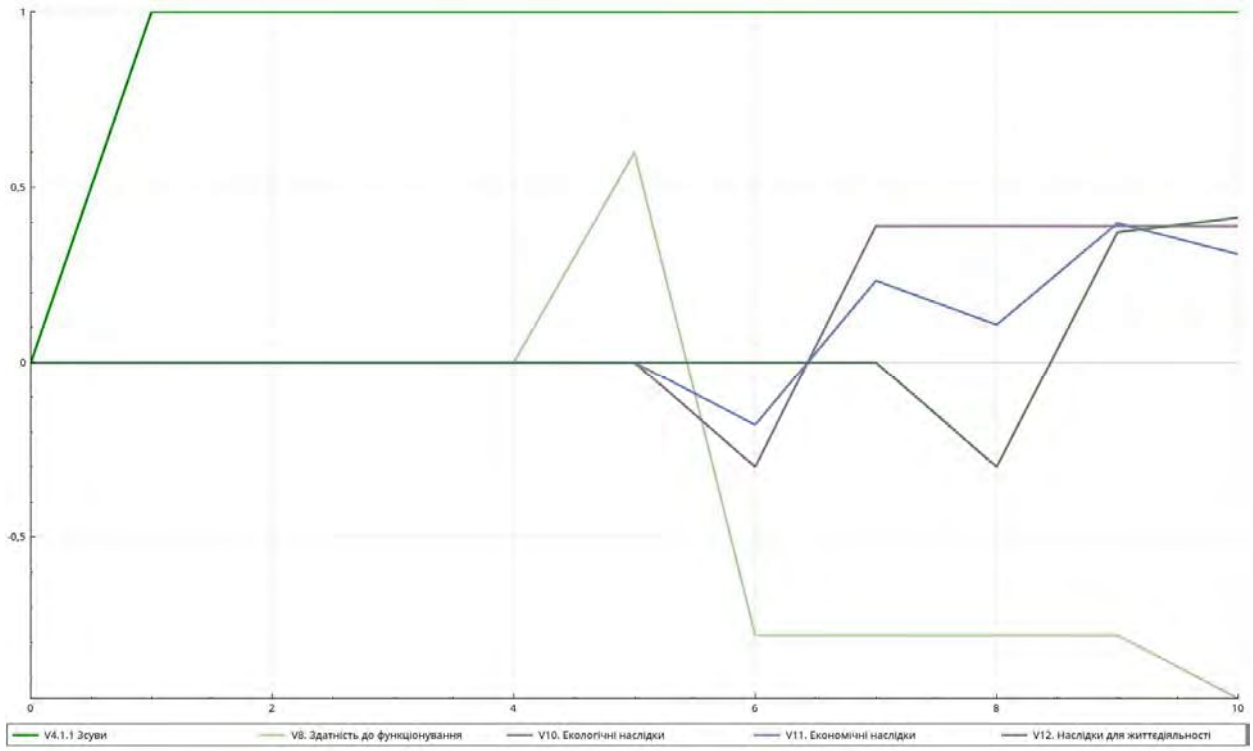


Рисунок 3.26 – Розподіл факторів: наслідки для життєдіяльності V12, екологічні V10 та економічні V11 наслідки, здатності до функціонування V8 системи трубних дюкерів під впливом екологічних факторів (зсуви). Сценарій №4

З отриманих результатів розрахунку Сценаріїв №3 та №4 бачимо, що для трубних дюкерів небажана подія природного походження «зсуви» є на 40% меншою загрозою, ніж подія антропогенного походження «злий умисел» – бойові дії, диверсії, тероризм.

Проведемо аналогічне імпульсне когнітивне моделювання для системи «тунельні дюкери». У таблиці 3.19 наведено вершини (концепти) моделі когнітивної карти системи «тунельні дюкери», а на рис. 3.27 – когнітивна карта G2 системи «тунельні дюкери».

Таблиця 3.19 – Вершини когнітивної карти G2 системи «тунельні дюкери»

Код	Найменування вершини	Код	Наслідки	Призначення вершини
V1	Система «тунельні дюкери»			Індикативна
V2	Події антропогенного походження	V2.1	Зі злим умислом: бойові дії, диверсії, тероризм	Збурючі
		V2.2	Без злого умислу: помилки, недбалість, недотримання норм будівництва або експлуатації	
V3	Події техногенного походження		Технічні і технологічні (технічні відмови, поломки, руйнування за рахунок технологічних факторів, корозії і т.д.)	Збурючі
V4	Природні катастрофи, погодні катаклізми	V4.1	Природні катастрофи, погодні катаклізми (атмосферні, гідросферні і літосферні збурення).	Збурючі
		V4.1.1	Зсуви, провали, просідання грунту	
V5	Охорона об’єкта			Базова
V6	Аварійний стан дюкерів		Абразивний знос, руйнування через промоїни під трубами і зовнішніх напружень зношеного матеріалу	Регулюючі
V7	Масштаб впливу небажаної події	V7.1	Структурний, або окрема ділянка	Регулюючі
		V7.2	Функціональний елемент об’єкта, або декілька ділянок	
		V7.3	Об’єкт повністю зруйновано	
		V7.4	Район міста і більш	
V8	Здатність до функціонування	V8.1	Об’єкт може виконувати всі функції	Регулюючі
		V8.2	Об’єкт припиняє функціонування	
V9	Час відновлення функціонування		Скільки часу знадобиться для відновлення об’єкта після впливу небажаної події.	Регулюючі
V10	Екологічні наслідки		Потенційні ризики для екологічної ситуації	Регулюючі
V11	Економічні наслідки		Очікувані економічні наслідки в разі настання небажаної події	Регулюючі
V12	Наслідки для життєдіяльності		Приблизна кількість осіб, умови життєдіяльності яких можуть бути порушені в разі настання небажаної події	Регулюючі
V12.1	Кількість постраждалих		Приблизна кількість осіб, які можуть постраждати в разі настання небажаної події	Регулюючі
V13	Економічні ресурси		Очікувані економічні збитки в разі настання небажаної події	Управляюча
V14	Організаційні, технічні та ін. ресурси		Очікувані ресурси в разі настання небажаної події	Управляюча
V15	Інвестор			Базова
V16	Цілісність системи руйнування		Наскільки сильні пошкодження отримав об’єкт в результаті впливу небажаної події	Регулюючі
V17	Матеріальний збиток (мінімальні розміри заробітної плати (МЗП).		Очікуваний розмір збитків в разі настання небажаної події на об’єкті	Регулюючі
V18	Геотехнологія будівництва			Базова
V19	Можливість передачі функцій системі трубних дюкерів		Можливість передачі функцій іншим об’єктам з різними видами обмежань	Керуюча

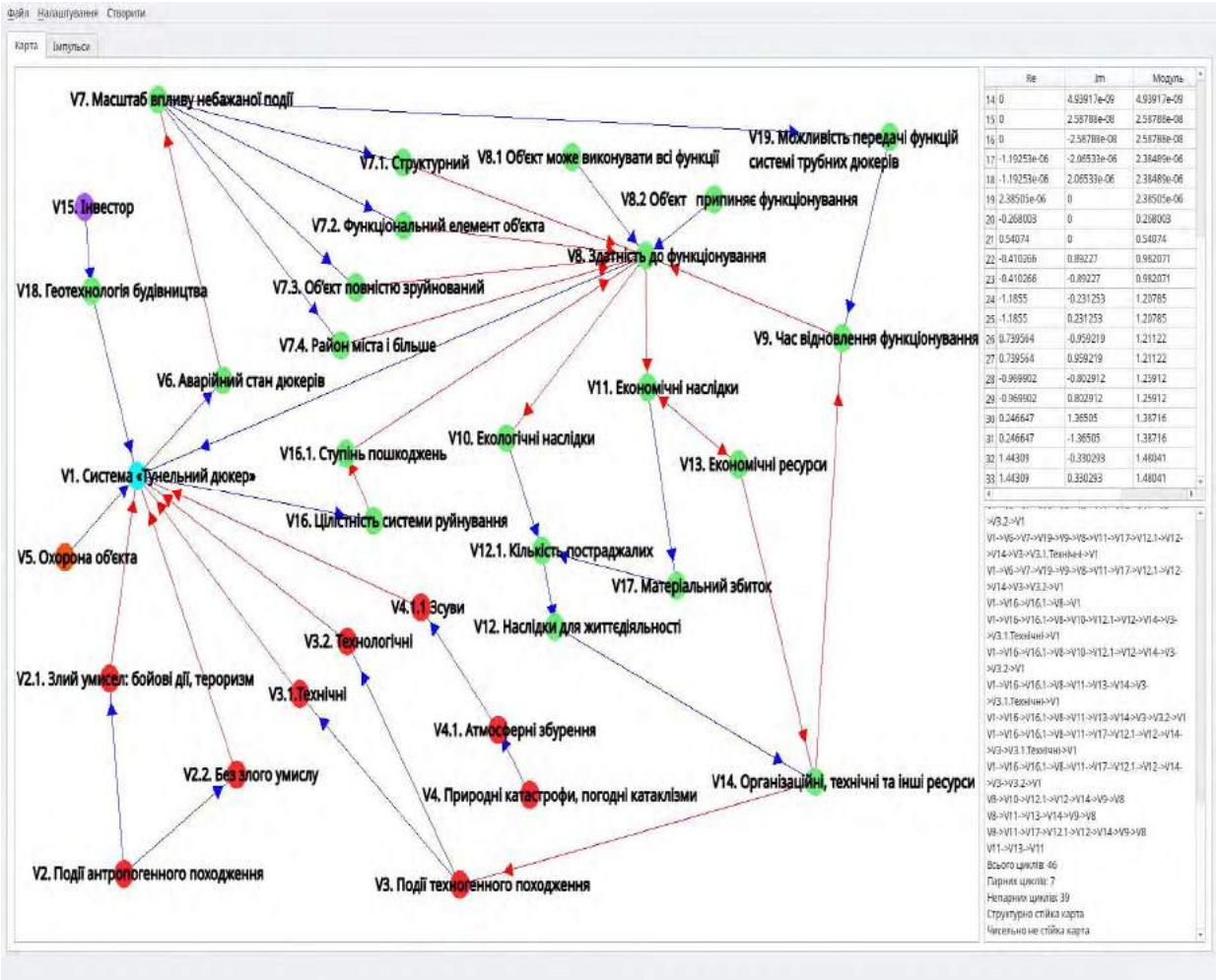


Рисунок 3.27 – Когнітивна карта *G*2 системи «Тунельний дюкер»

	Re	Im	Модуль
15	0	2.58788e-08	2.58788e-08
16	0	-2.58788e-08	2.58788e-08
17	-1.19253e-06	-2.06533e-06	2.38489e-06
18	-1.19253e-06	2.06533e-06	2.38489e-06
19	2.38505e-06	0	2.38505e-06
20	-0.268003	0	0.268003
21	0.54074	0	0.54074
22	-0.410266	0.89227	0.982071
23	-0.410266	-0.89227	0.982071
24	-1.1855	-0.231253	1.20785
25	-1.1855	0.231253	1.20785
26	0.739564	-0.959219	1.21122
27	0.739564	0.959219	1.21122
28	-0.969902	-0.802912	1.25912
29	-0.969902	0.802912	1.25912
30	0.246647	1.36505	1.38716
31	0.246647	-1.36505	1.38716
32	1.44309	-0.330293	1.48041
33	1.44309	0.330293	1.48041

Рисунок 3.28 – Пошук власних значень матриці суміжності *G*2

З наведених розрахунків на рис. 3.27 і 3.28 бачимо, що когнітивна карта *G*2 має 46 циклів, з них 39 негативних і 7 позитивних, тобто *G*2 структурно стійка, але не стійка чисельно, |M|=1,48>1.

Приводимо когнітивну карту *G*2 до чисельної стійкості. З метою досягнення чисельної стійкості врахуємо значення зв'язків між деякими вершинами когнітивної карти, а саме:

1) $V2_{.1.}$-> $V_{1.} = -0.1$

2) $V4.1_{.1.}$-> $V_{1.} = -0.2$

3) $V7_{.1.}$-> $V.8 = -0.1$

4) $V7_{.2.}$-> $V.8 = -0.2$

5) $V7_{.3.}$-> $V_{8.} = -0.01$

6) $V7_{.4.}$-> $V_{8.} = -0.01$

8) $V_{8.}$-> $V1_{1.} = -0.2$

9) $V1_{3.}$-> $V_{1.1.} = -0.2$

12) $V1_{4.}$-> $V_{9.} = -0{,}6$

13) $V_{9.}$-> $V_{8.} = -0{,}2$

14) $V1_{4.}$-> $V_{3.} = -0{,}3$

Врахування наведених значень зв'язків між деякими вершинами когнітивної карти призводить когнітивну карту G2 до чисельно стійкої, яка наведена на рис. 3.29.

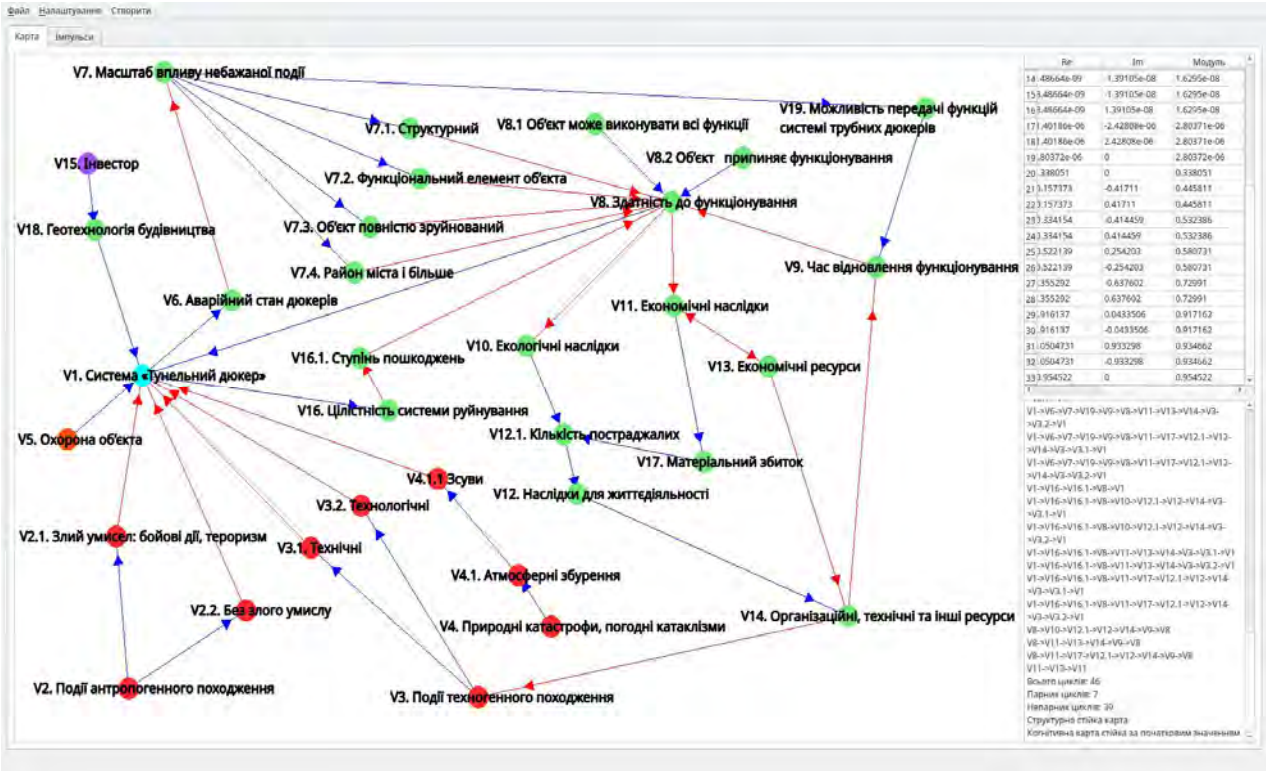


Рисунок 3.29 – Стійка когнітивна карта $G2$: система «Тунельний дюкер»

V1->V6->V7->V19->V9->V8->V11->V13->V14->V3->V3.2->V1
V1->V6->V7->V19->V9->V8->V11->V17->V12.1->V12->V14->V3->V3.1->V1
V1->V6->V7->V19->V9->V8->V11->V17->V12.1->V12->V14->V3->V3.2->V1
V1->V16->V16.1->V8->V1
V1->V16->V16.1->V8->V10->V12.1->V12->V14->V3->V3.1->V1
V1->V16->V16.1->V8->V10->V12.1->V12->V14->V3->V3.2->V1
V1->V16->V16.1->V8->V11->V13->V14->V3->V3.1->V1
V1->V16->V16.1->V8->V11->V13->V14->V3->V3.2->V1
V1->V16->V16.1->V8->V11->V17->V12.1->V12->V14->V3->V3.1->V1
V1->V16->V16.1->V8->V11->V17->V12.1->V12->V14->V3->V3.2->V1
V8->V10->V12.1->V12->V14->V9->V8
V8->V11->V13->V14->V9->V8
V8->V11->V17->V12.1->V12->V14->V9->V8
V11->V13->V11
Всього циклів: 46
Парних циклів: 7
Непарних циклів: 39
Структурно стійка карта

Рисунок 3.30 – Пошук циклів матриці суміжності $G2$

З досвіду врахування причинно-слідкових значень зв’язків вершин відомо, що ця процедура є необхідною для отримання більш достовірних результатів, що обумовлює необхідність приведення когнітивної карти до чисельної і структурної стійкості.

Проведемо імпульсне когнітивне моделювання для стійкої карти G2 – системи «тунельний дюкер».

Сценарій №5. Система «тунельний дюкер» знаходиться під впливом антропогенних факторів «злий умисел» (бойові дії, тероризм), збурюючий імпульс q2.1=+1 надходить до вершини V2.1.

Результати розрахунку Сценарію №5 наведені на рис. 3.31 і 3.32.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V1. Система «Тунельний дюкер»	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.18	-0.2056	-0.2216	-0.2216	-0.2856
V2. Події антропогенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.1. Злий умисел: бойові дії, тероризм	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V2.2. Без злого умислу	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3. Події техногенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.006	-0.01092
V3.1. Технічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.006
V3.2. Технологічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.006
V4. Природні катастрофи, погодні катаклізми	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1. Атмосферні збурення	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1.1 Зсуви	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V5. Охорона об'єкта	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V6. Аварійний стан дюкерів	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.18	-0.2056	-0.2216	-0.2216
V7. Масштаб впливу небажаної події	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.2056	0.2216
V7.1. Структурний	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.2056
V7.2. Функціональний елемент об'єкта	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.2056
V7.3. Об'єкт повністю зруйнований	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.2056
V7.4. Район міста і більше	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.2056
V8. Здатність до функціонування	0	0	0	0	0	-0.1	-0.132	-0.152	-0.152	-0.232	-0.2808
V8.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8.2 Об'єкт припиняє функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V9. Час відновлення функціонування	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.088	0.15816
V10. Екологічні наслідки	0	0	0	0	0	0	0.01	0.0132	0.0152	0.0152	0.0232
V11. Економічні наслідки	0	0	0	0	0	0	0.02	0.0264	0.0344	0.03568	0.05328
V12. Наслідки для життєдіяльності	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.0134	0.015464
V12.1. Кількість постраджалих	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.0134	0.015464	0.015544
V13. Економічні ресурси	0	0	0	0	0	0	0	-0.02	-0.0264	-0.0344	-0.03568
V14. Організаційні, технічні та інші ресурси	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.0364	0.0478
V15. Інвестор	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V16. Цілісність системи руйнування	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.18	-0.2056	-0.2216	-0.2216
V16.1. Ступінь пошкоджень	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.2056	0.2216
V17. Матеріальний збиток	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.0264	0.0344	0.03568
V18. Геотехнологія будівництва	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V19. Можливість передачі функцій системі трубних дюкерів	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.2056

Рисунок 3.31 – Результати обчислювального експерименту. Сценарій №5

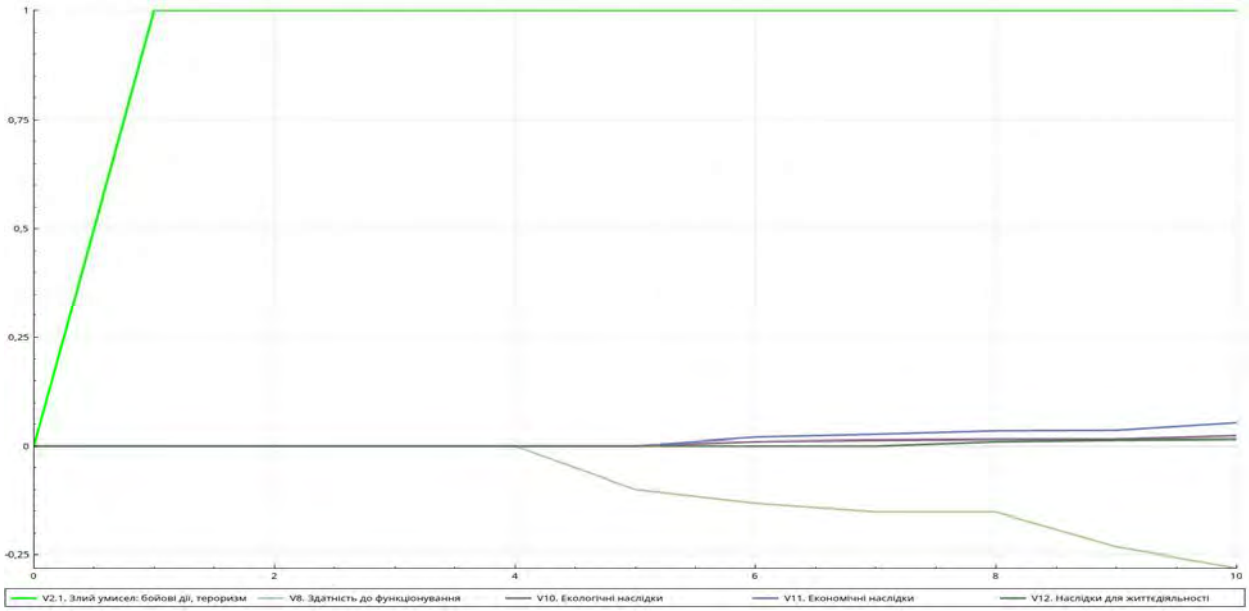


Рисунок 3.32 – Розподіл факторів: наслідки для життєдіяльності V12, екологічні V10 та економічні V11 наслідки, здатності до функціонування V8 системи «Тунельний дюкер» під впливом антропогенних факторів «злий умисел».

Сценарій №5

З наведених розрахунків моделювання та порівняння здатності функціонування тунельних дюкерів V8=–0.2808 з трубними дюкерами V8=–1.6, різниця становить до 82,45%, що суттєво перевищує здатність функціонування трубних дюкерів під дією антропогенних факторів «злий умисел» (бойові дії, тероризм) та обумовлює доцільність побудови тунельних дюкерів.

Сценарій №6. Система «тунельні дюкери» знаходиться під впливом екологічних факторів (зсуви), збурюючий імпульс $q_{4\text{-}1.1}$=+1 надходить до вершини V4.1.1.

Результати розрахунків знаходяться на рис. 3.33 і рис. 3.34.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V1. Система «Тунельний дюкер»	0	0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.36	-0.4112	-0.4432	-0.4432	-0.5712
V2. Події антропогенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.1. Злий умисел: бойові дії, тероризм	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2.2. Без злого умислу	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3. Події техногенного походження	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.012	-0.02184
V3.1. Технічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.012
V3.2. Технологічні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.012
V4. Природні катастрофи, погодні катаклізми	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1. Атмосферні збурення	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4.1.1 Зсуви	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V5. Охорона об'єкта	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V6. Аварійний стан дюкерів	0	0	0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.36	-0.4112	-0.4432	-0.4432
V7. Масштаб впливу небажаної події	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.36	0.4112	0.4432
V7.1. Структурний	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.36	0.4112
V7.2. Функціональний елемент об'єкта	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.36	0.4112
V7.3. Об'єкт повністю зруйнований	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.36	0.4112
V7.4. Район міста і більше	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.36	0.4112
V8. Здатність до функціонування	0	0	0	0	0	-0.2	-0.264	-0.304	-0.304	-0.464	-0.5616
V8.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8.2 Об'єкт припиняє функціонування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V9. Час відновлення функціонування	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.176	0.31632
V10. Екологічні наслідки	0	0	0	0	0	0	0.02	0.0264	0.0304	0.0304	0.0464
V11. Економічні наслідки	0	0	0	0	0	0	0.04	0.0528	0.0688	0.07136	0.10656
V12. Наслідки для життєдіяльності	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.0268	0.030928
V12.1. Кількість постраждалих	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.0268	0.030928	0.031088
V13. Економічні ресурси	0	0	0	0	0	0	0	-0.04	-0.0528	-0.0688	-0.07136
V14. Організаційні, технічні та інші ресурси	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.0728	0.0956
V15. Інвестор	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V16. Цілісність системи руйнування	0	0	0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.36	-0.4112	-0.4432	-0.4432
V16.1. Ступінь пошкоджень	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.36	0.4112	0.4432
V17. Матеріальний збиток	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.0528	0.0688	0.07136
V18. Геотехнологія будівництва	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V19. Можливість передачі функцій системі трубних дюкерів	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.36	0.4112

Рисунок 3.33 – Результати обчислювального експерименту. Сценарій №6

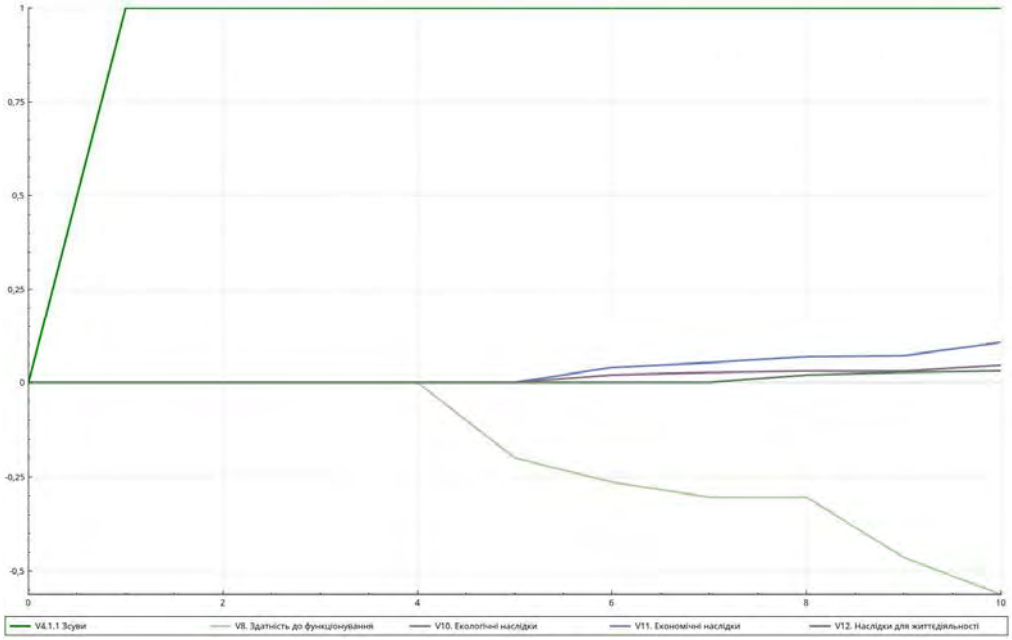


Рисунок 3.34 – Розподіл факторів: наслідки для життєдіяльності V12, екологічні V10 та економічні V11 наслідки, здатності до функціонування V8 системи «Тунельний дюкер» під впливом екологічних факторів (зсуви). Сценарій №6

Результати проведеного чисельного експерименту імпульсного когнітивного моделювання для тунельних та трубних дюкерів в умовах подій антропогенного (бойові дії, диверсія, тероризм) та природного походження (зсуви) наведені у таблиці 3.20. Бачимо, що в результаті дії злого умислу (бойові дії, тероризм, рис. 3.33, 3.34, Сценарій 5), суттєво, більш ніж на 80%, зменшується здатність V8 до функціонування трубних дюкерів порівняно з тунельними, до 97.76% V12 досягає різниця в порівнянні негативних наслідків життєдіяльності, а також на 96.43% екологічних V10 та 89.67% V11 економічних наслідків для трубних дюкерів. За умов природного походження розглядалися зсуви. При цьому здатність до функціонування тунельних дюкерів на 41.5% більш надійна, ніж трубних дюкерів. В той же час різниця наслідків для тунельних і трубних дюкерів для більш суттєвих факторів, а саме: життєдіяльності V12, екологічних V10 та економічних V11 наслідків складають відповідно 88.1%, 65.58%, 92.52%.

Таблиця 3.20 – Порівняння значень подій антропогенного і природного походження для трубних та тунельних дюкерів

Вершини	Події антропогенного походження. Злий умисел: бойові дії, диверсія, тероризм		Різниця доцільності користування трубними та тунельними дюкерами	Події природного походження: зсуви		Різниця доцільності користування трубними та тунельними дюкерами
	трубні дюкери	тунельні дюкери		трубні дюкери	тунельні дюкери	
V8	–1.6	–0.2808	82.45%	–0.96	-0.5616	41.5%
V10	0.65	0.0232	96.43%	0.39	0.0464	88.1%
V11	0.516	0.05328	89.67%	0.3096	0.10656	65.58%
V12	0.689	0.015464	97.76%	0.4134	0.030928	92.52%

Проведені чисельні експерименти при залученні імпульсного когнітивного моделювання показали доцільність заміни трубних дюкерів на тунельні з точки зору безпеки та якості життя людини.

3.5 Обгрунтування системного концепту тунельного переходу

Побудована в п. 2.3 морфологічна модель небажаних подій і їх наслідків була застосована для обгрунтування переваг концепту тунельного переходу р. Дніпро порівняно з мостовими переходами.

Вхідні оцінки морфологічної таблиці першого етапу МММА (параметри і альтернативи небажаних подій), а також результат їх перерахунку на основі матриці взаємозв'язків наведені в табл. 3.21. В цій задачі альтернатива «1.6 Порушення функціонування без конструктивних пошкоджень» була вилучена з розгляду, оскільки для мостових або тунельних переходів річки вона не має сенсу.

Таблиця 3.21 – Вхідні оцінки і результат розрахунку МММА для параметрів і альтернатив небажаних подій

Параметр	Альтернатива	Вхідні нормовані оцінки		Після врахування взаємозв'язків	
		Міст	Тунель	Міст	Тунель
1. Тип небажаної події	1.1 Вибух	0,8	0,65	0,272	0,215
	1.2 Пожежа	0,65	0,5	0,197	0,164
	1.3 Зсуви, провали та просідання ґрунту	0,35	0,65	0,061	0,230
	1.4 Погодні катаклізми	0,8	0,05	0,111	0,006
	1.5 Пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту	0,8	0,65	0,360	0,385
2. Походження небажаної події	2.1 Антропогенне зі злим умислом	0,8	0,65	0,382	0,331
	2.2 Антропогенне без злого умислу	0,8	0,5	0,221	0,031
	2.3. Технічне, технологічне	0,65	0,65	0,179	0,475
	2.4 Природне	0,65	0,05	0,218	0,162
3. Масштаб впливу небажаної події	3.1 Окремий елемент об'єкта, або окрема обмежена ділянка	0,95	0,8	0,522	0,668
	3.2 Декілька елементів об'єкта, або декілька ділянок	0,8	0,5	0,271	0,265
	3.3 Об'єкт повністю	0,65	0,2	0,144	0,062
	3.4 Об'єкт і сусідні до нього	0,5	0,05	0,034	0,003
	3.5 Район міста і більше	0,5	0,05	0,028	0,002

На основі експертного опитування були заповнені матриці зв'язків першого і другого етапів МММА, які пов'язують параметри небажаних подій і їх наслідків. Параметр «В. Можливість передачі функцій іншим об'єктам» для цієї задачі не розглядався, оскільки поруч немає інших переходів, тому його єдиною альтернативою є «Неможливо» незалежно від конфігурації небажаної події. Результат розрахунку ваг наслідків небажаних подій при можливості виникнення будь-якої конфігурації небажаної події наведено в табл. 3.22.

Таблиця 3.22 – Ваги наслідків небажаних подій при можливості виникнення будь-якої конфігурації небажаної події

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Міст	Тунель
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,001	0,003
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,083	0,087
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,915	0,910
	А.4 Пошкодження невідновні	0,001	0,000
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,005	0,024
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,252	0,395
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,743	0,581
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,011	0,013
	Г.2 До 7 діб	0,476	0,687
	Г.3 До 1 місяця	0,481	0,296
	Г.4 До 0,5 року	0,031	0,003
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,001	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	0,099	0,205
	Д.2 До 10 осіб	0,631	0,651
	Д.3 10–50 осіб	0,244	0,135
	Д.4 50–200 осіб	0,026	0,008
	Д.5 Більше 200 осіб	0,001	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,160	0,175
	Е.2 До 10 осіб	0,007	0,003
	Е.3 10–100 осіб	0,018	0,003
	Е.4 100–1000 осіб	0,353	0,359
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,462	0,459
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,022	0,260
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,298	0,643
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,600	0,096
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,080	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,220	0,727
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,780	0,273
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території	0,000	0,000
	З.4 Екологічна катастрофа	0,000	0,000

Також розглядалася задача МММА з фіксованим параметром для дослідження більш конкретних сценаріїв небажаних подій. Були обрані два сценарії:

Сценарій 1 – зафіксована альтернатива «1.1 Вибух»;

Сценарій 2 – зафіксована альтернатива «1.4 Погодні катаклізми».

Результати розрахунку ваг наслідків небажаних подій наведені в табл. 3.23 для сценарію 1; в табл. 3.24 для сценарію 2.

Таблиця 3.23 – Ваги наслідків небажаних подій при зафіксованій альтернативі «1.1 Вибух»

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Міст	Тунель
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,000	0,003
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,026	0,052
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,972	0,945
	А.4 Пошкодження невідновні	0,002	0,000
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,000	0,008
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,161	0,273
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,839	0,719
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,000	0,004
	Г.2 До 7 діб	0,443	0,674
	Г.3 До 1 місяця	0,502	0,316
	Г.4 До 0,5 року	0,054	0,006
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,001	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	0,000	0,000
	Д.2 До 10 осіб	0,574	0,655
	Д.3 10–50 осіб	0,367	0,313
	Д.4 50–200 осіб	0,056	0,032
	Д.5 Більше 200 осіб	0,002	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,000	0,064
	Е.2 До 10 осіб	0,011	0,006
	Е.3 10–100 осіб	0,026	0,006
	Е.4 100–1000 осіб	0,384	0,355
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,579	0,568
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,019	0,205
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,163	0,685
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,677	0,110
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,142	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,199	0,679
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,801	0,321
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території	0,000	0,000
	З.4 Екологічна катастрофа	0,000	0,000

Таблиця 3.24 – Ваги наслідків небажаних подій при зафіксованій альтернативі «1.4 Погодні катаклізми»

Параметр	Альтернатива	Оцінка	
		Міст	Тунель
А) Цілісність об'єкта/його елементів	А.1 Пошкоджень немає або вони мінімальні	0,004	0,107
	А.2 Пошкодження можуть бути відновлені без переривання функціональності	0,047	0,232
	А.3 Пошкодження можуть бути відновлені з перериванням функціональності	0,949	0,661
	А.4 Пошкодження невідновні	0,000	0,000
Б) Здатність до функціонування	Б.1 Об'єкт може виконувати всі функції	0,011	0,274
	Б.2 Об'єкт може виконувати частину функцій	0,333	0,695
	Б.3 Об'єкт припиняє функціонування	0,656	0,030
Г) Час відновлення функціонування	Г.1 Непотрібний	0,013	0,099
	Г.2 До 7 діб	0,601	0,647
	Г.3 До 1 місяця	0,375	0,254
	Г.4 До 0,5 року	0,011	0,000
	Г.5 Об'єкт не може бути відновлений протягом 1 року	0,000	0,000
Д) Кількість постраждалих	Д.1 Немає	0,070	0,593
	Д.2 До 10 осіб	0,649	0,399
	Д.3 10–50 осіб	0,265	0,008
	Д.4 50–200 осіб	0,015	0,000
	Д.5 Більше 200 осіб	0,000	0,000
Е) Порушені умови життєдіяльності	Е.1 Немає	0,197	0,924
	Е.2 До 10 осіб	0,006	0,000
	Е.3 10–100 осіб	0,006	0,000
	Е.4 100–1000 осіб	0,338	0,032
	Е.5 Більше 1000 осіб	0,453	0,044
Ж) Розмір матеріальних збитків	Ж.1 До 100 МЗП	0,014	0,433
	Ж.2 100–1000 МЗП	0,286	0,567
	Ж.3 1000–10000 МЗП	0,657	0,000
	Ж.4 більше 10000 МЗП	0,043	0,000
З) Екологічні наслідки	З.1 Немає	0,082	0,641
	З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації	0,918	0,359
	З.3 Значне тривале погіршення екологічної ситуації на значній території	0,000	0,000
	З.4 Екологічна катастрофа	0,000	0,000

Результати можуть бути більш наглядно представлені у формі діаграм (рис. 3.35–3.41). На графіках лінія «Загальний» відповідає можливості виникнення будь-якої конфігурації небажаної події.

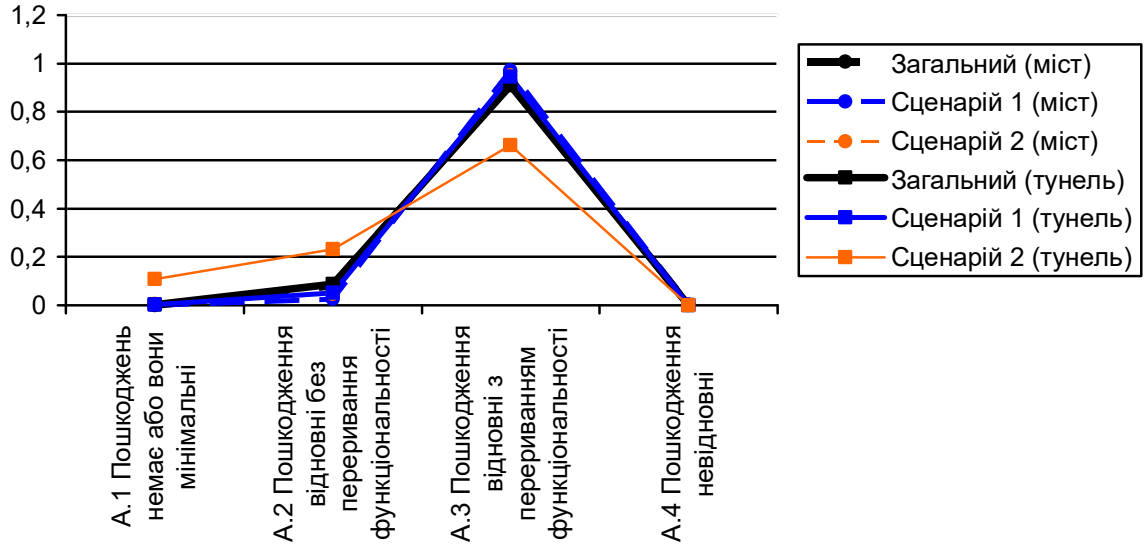


Рисунок 3.35 – Діаграма ваг альтернатив параметра А – «Цілісність об’єкта/його елементів»

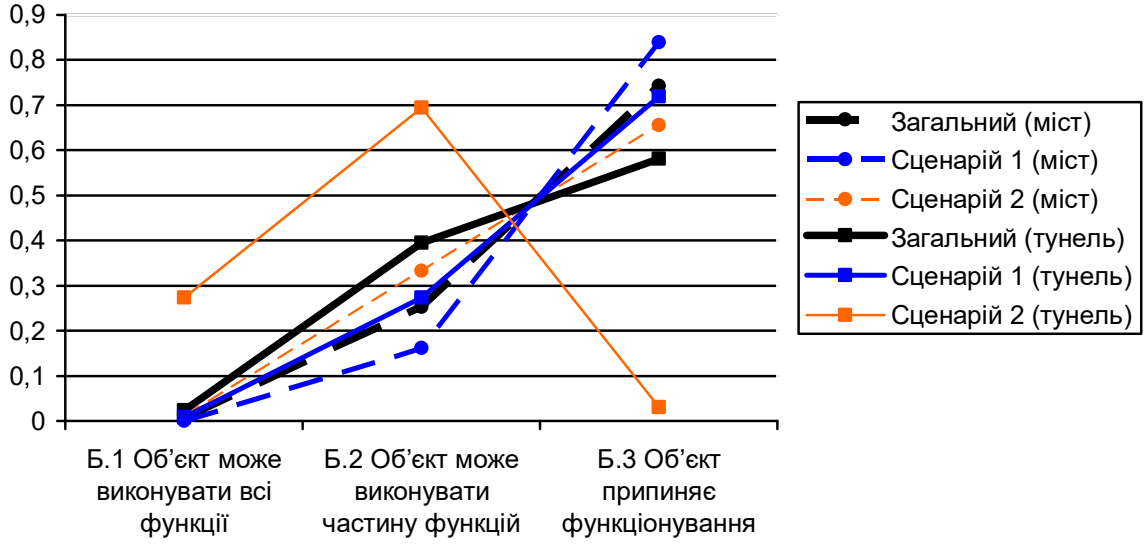


Рисунок 3.36 – Діаграма ваг альтернатив параметра Б – «Здатність до функціонування»

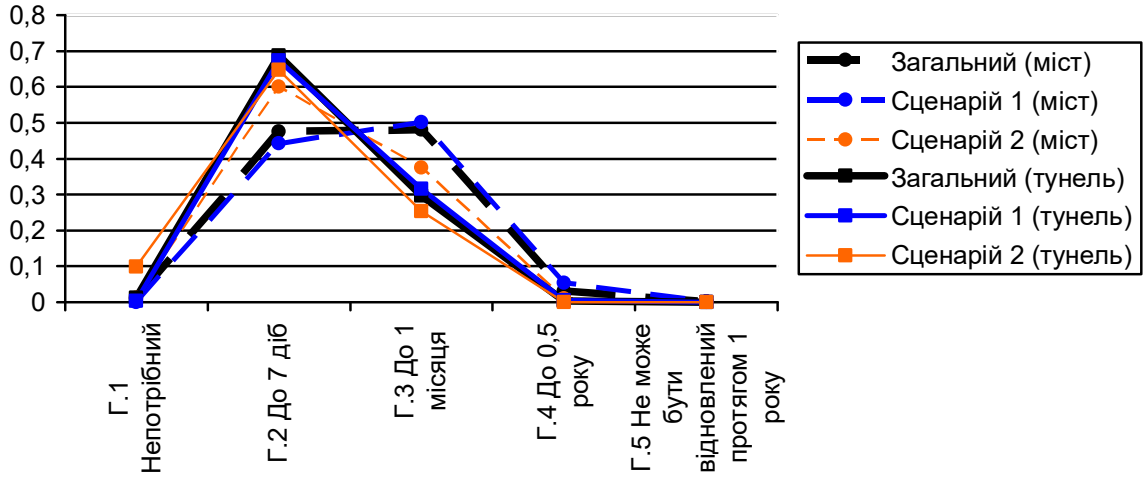


Рисунок 3.37 – Діаграма ваг альтернатив параметра Г – «Час відновлення функціонування»

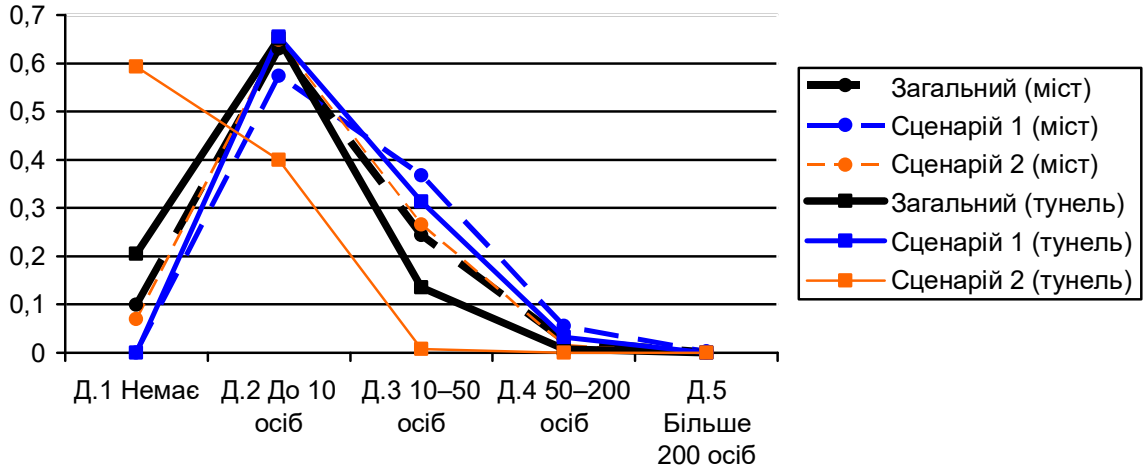


Рисунок 3.38 – Діаграма ваг альтернатив параметра Д – «Кількість постраждалих»

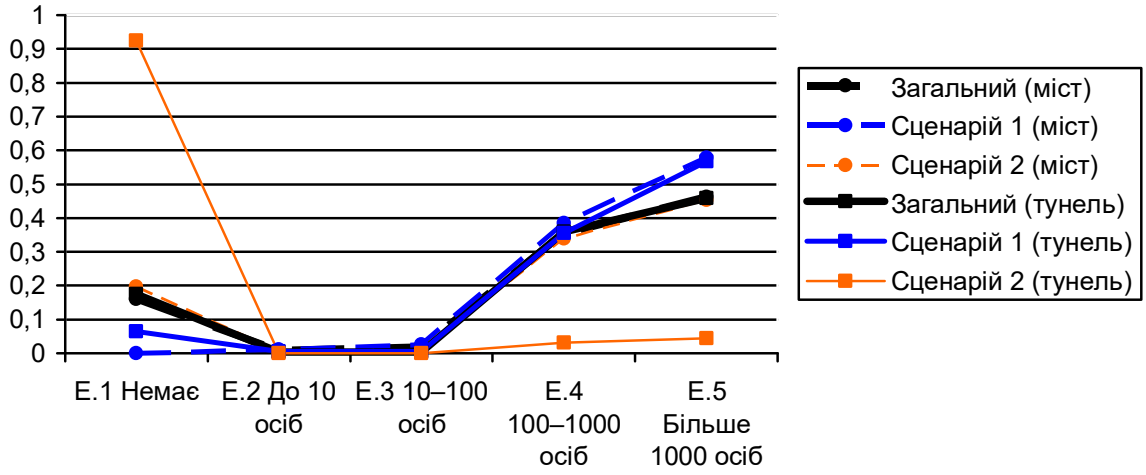


Рисунок 3.39 – Діаграма ваг альтернатив параметра Е – «Порушені умови життєдіяльності»

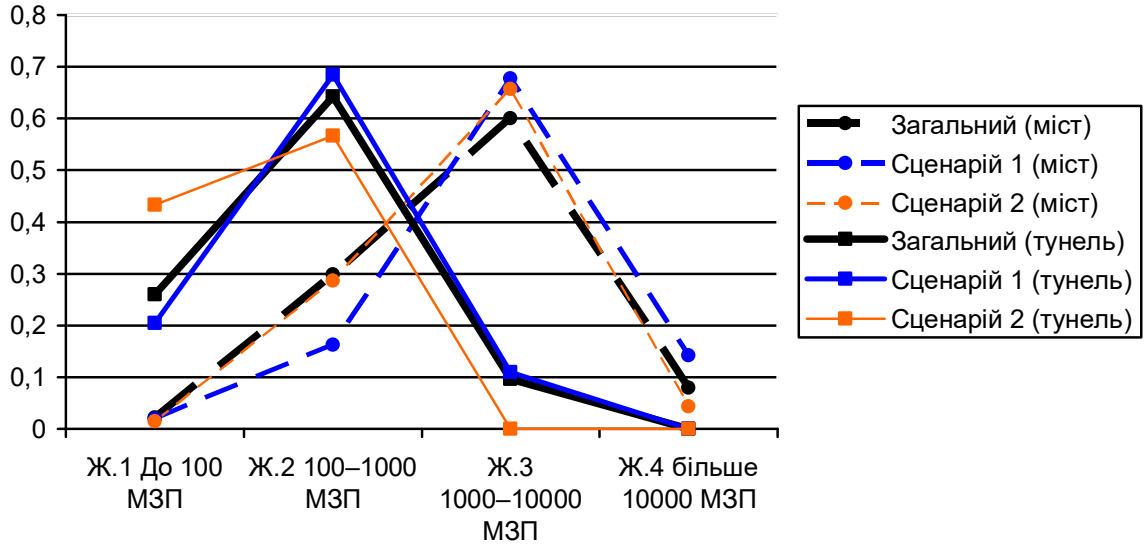


Рисунок 3.40 – Діаграма ваг альтернатив параметра Ж – «Розмір матеріальних збитків»

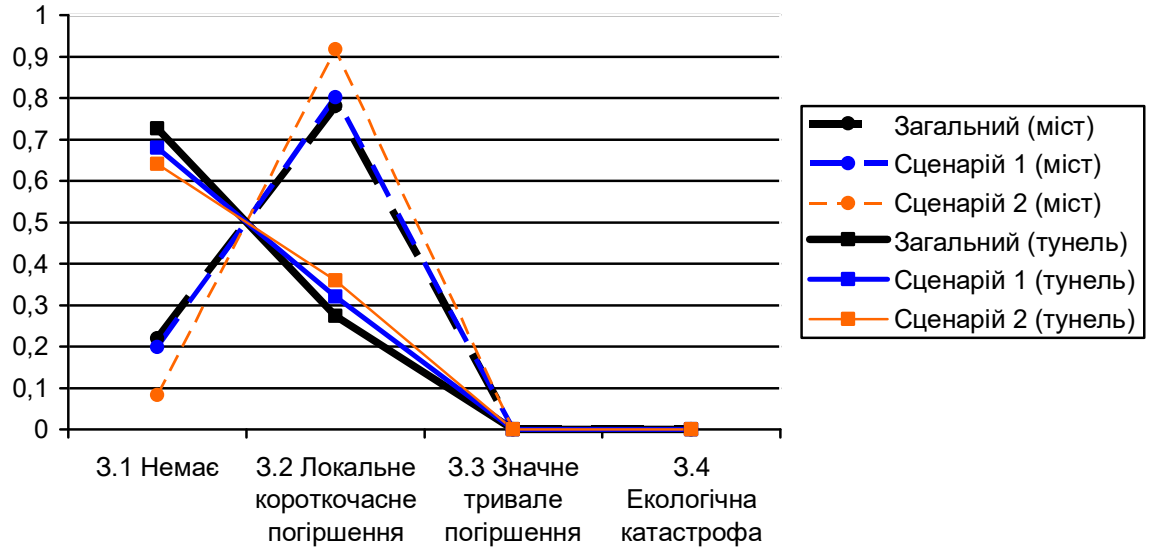


Рисунок 3.41 – Діаграма ваг альтернатив параметра З – «Екологічні наслідки»

Як і в попередній задачі, діаграми побудовані таким чином, що зміщення площі під графіком ліворуч означає більшу сприятливість відповідного об’єкта або сценарію.

З діаграм можна зробити ряд висновків:

– з точки зору стійкості до припинення функціонування (параметри А – «Цілісність об’єкта/його елементів», Б – «Здатність до функціонування») тунельний перехід має незначну перевагу над мостовим переходом, однак сильно виділяється сценарій погодних катаклізмів, при яких тунельний перехід демонструє набагато кращі показники для цих параметрів (рис. 3.35, 3.36);

– з точки зору відновлення функціонування в разі настання небажаних подій тунельний перехід має перевагу над мостовим переходом, що видно із параметра Г – «Час відновлення функціонування» (рис. 3.37), і особоливо параметра Ж – «Розмір матеріальних збитків» (рис. 3.40), в якому для тунельного переходу альтернатива Ж.2 – «100–1000 МЗП» має однозначну перевагу над іншими, тоді як для мосту така ж однозначна перевага спостерігається для альтернативи Ж.3 – «1000–10000 МЗП», тобто як в середньому, так і в розглянутих сценаріях

небажаних подій збитки від аварій і катастроф для мостів будуть приблизно в 10 раз вищі, ніж для тунелів;

– кількість постраждалих в разі настання небажаних подій (параметр Д – «Кількість постраждалих», рис. 3.38) для обох типів об’єктів приблизно однакова, з невеликою перевагою тунелів. На цей показник більший вплив здійснює вибір розглядуваного сценарію, оскільки при вибуху кількість постраждалих суттєво збільшується порівняно з загальним сценарієм або сценарієм погодних катаклізмів;

– аналіз параметру Е – «Порушені умови життєдіяльності» (рис. 3.39) практично співпадає з результатами для параметру Б – «Здатність до функціонування», оскільки умови життєдіяльності порушуються в разі часткового або повного припинення функціонування переходу, тому тут перевага тунелю незначна, крім сценарію погодного катаклізму, де тунельний перехід також демонструє абсолютну перевагу;

– для параметра З – «Екологічні наслідки» (рис. 3.41) ненульові ваги спостерігаються тільки для альтернатив «З.1 Немає» і «З.2 Незначне, локальне, короткочасне погіршення екологічної ситуації», оскільки обидва типи переходів не здатні спричинити серйозний негативний вплив на екологічну ситуацію. Однак тут перевага тунелю також однозначна.

Таким чином, концепт тунельного переходу вочевидь є більш доцільним з точки зору екологічних наслідків, реалізації небажаних подій терористичного, техногенного чи природного характеру, а також технічної надійності та довговічності.

3.6 Концепти дюкерів під Дніпром

Метою розроблення концептів дюкерів є забезпечення надійного транспортування каналізаційних стоків від правобережної частини м. Києва та прилеглих територій на очисні споруди «Бортницької станції аерації» (лівий

берег) для їх подальшого очищення, що знизить ризик виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з можливою аварійною зупинкою діючих дюкерів через знос труб, і відповідно виключить ймовірне забруднення річки Дніпро стічними водами.

Русло р. Дніпро в районі дюкерного переходу прямолінійне шириною близько 850 м. Глибини – до 10 м. Зараз підводний перехід має сім трубних дюкерів через р. Дніпро (рис. 3.42, 3.43):

• перший, верхній за течією дюкер VII (напірний) ø 1600 мм;
• другий за течією дюкер I (самоналівний) ø 1400 мм;
• третій за течією дюкер II (самоналівний) ø 1400 мм;
• четвертий за течією дюкер III (самоналівний) ø 1400 мм;
• п’ятий за течією дюкер IV (самоналівний) ø 1400 мм;
• шостий за течією дюкер V (напірний) ø 1400 мм;
• сьомий, нижній за течією дюкер VI (напірний) ø 1400 мм.

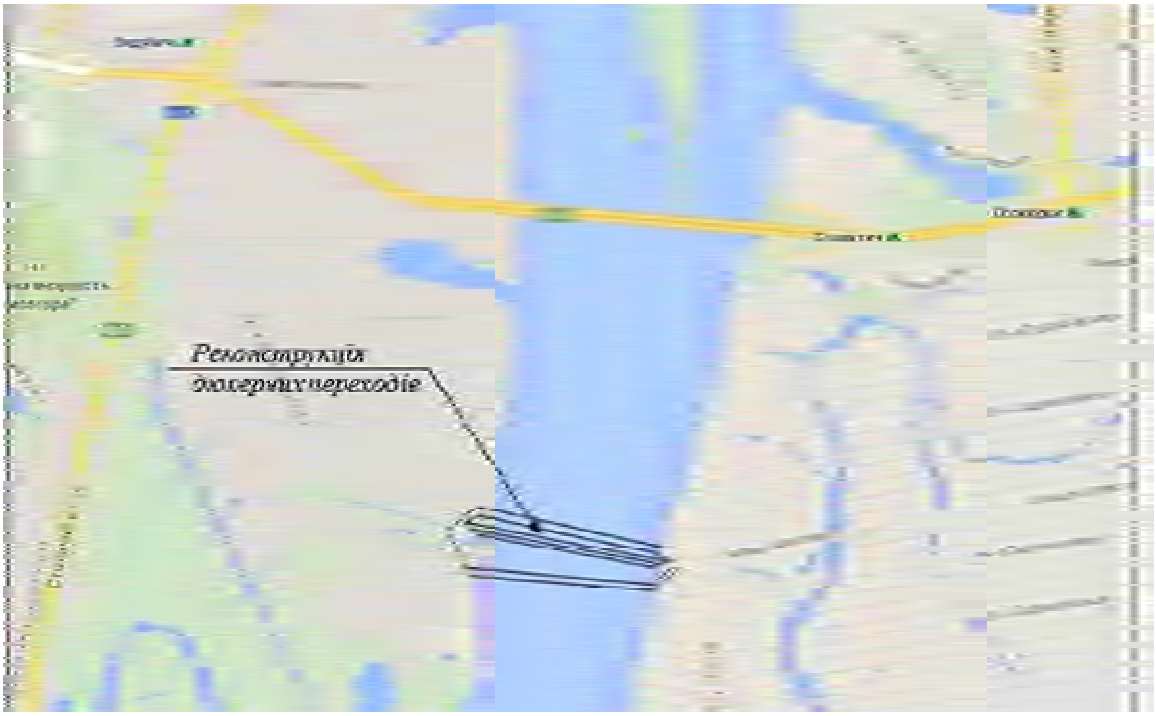


Рис. 3.42 – Розташування дюкерних переходів Дніпра у м. Києві

За результатами приладо-водолазного обстеження, виконаного ТОВ «Дайвтехнобуд 2», виявлені суттєві порушення в охоронній зоні дюкерних переходів через р. Дніпро. Встановлено, що технічний стан всіх дюкерних переходів відноситься до категорії – «пошкоджений». Виявлена значна зношеність стінок труб, значні накопичення в донній частині мінеральних і органічних відкладеь (до 50% перетину труб). В русловій частині переходів товщина шару ґрунту над трубопроводом становить менше 1 м (на окремих ділянках труби виходять на донну поверхню), причому наявність цих вимоїн і провислих частин може зумовити пошкодження трубопроводів.

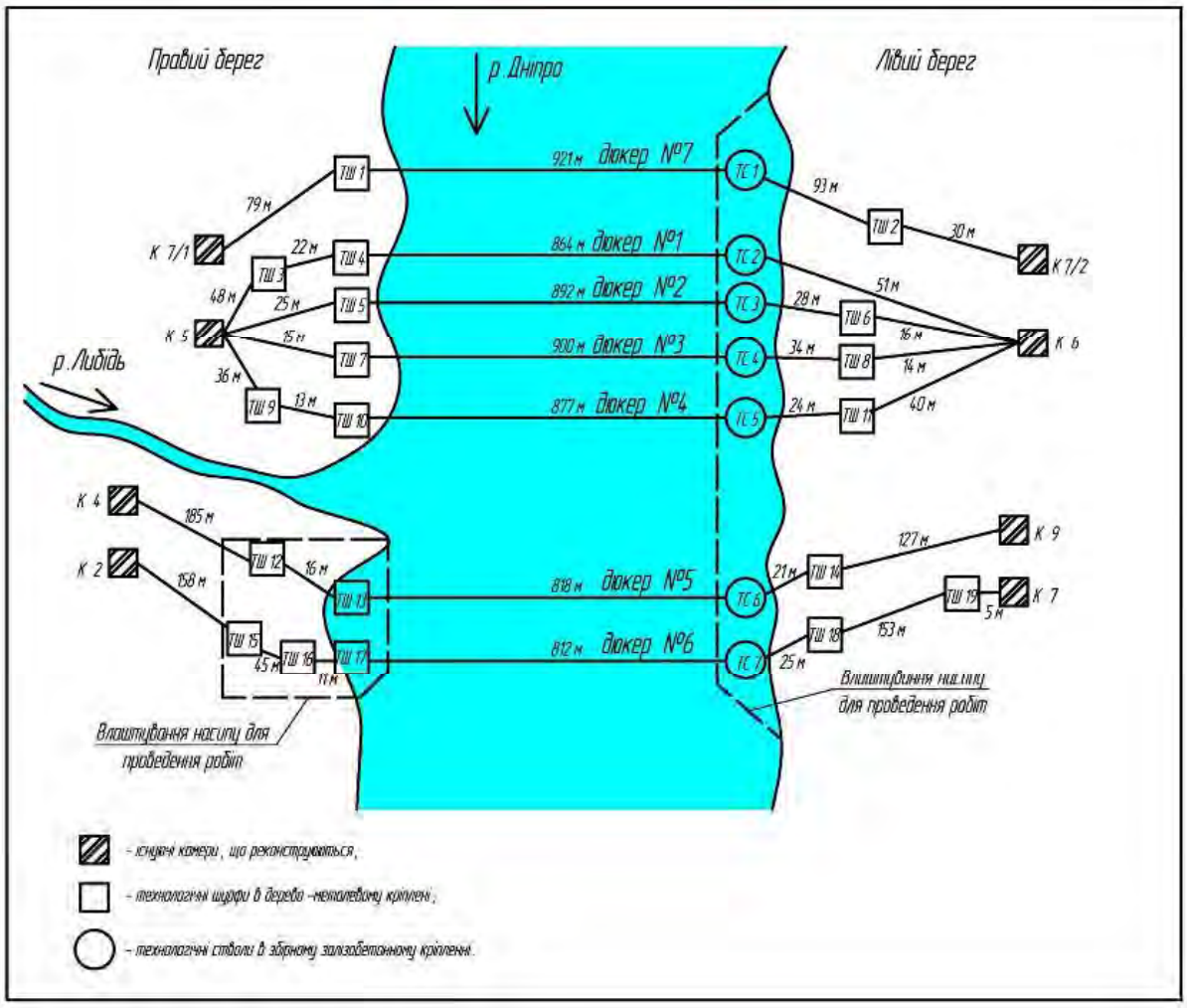


Рис. 3.43 – Схема трубних дюкерів під Дніпром (проєкт реконструкції)

Для запобігання катастрофічної ситуації, пов’язаної з проривом колекторів і витоком стічних вод в річку Дніпро передбачено проведення санації аварійних колекторів шляхом введення в них гнучкого полімерного рукава «Aarsleff» (Аарслеф) під тиском стовпа води з наступною полімеризацією. Введення рукава здійснюється після викриття в котлованах кінців нитки старого трубопроводу і очищення його від різних відкладень. Перед введенням полімерного рукава передбачається чистка існуючих колекторів від продуктів корозії та відкладень.

Як показав аналіз [11, 68], запропонована санація може розглядатися лише як тимчасова міра збільшення надійності та безпеки трубних дюкерів. Проведені дослідження (пп. 3.2, 3.3) свідчать, 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. Крім того зберігається висока ймовірність технічного (експлуатаційного) руйнування вже пошкоджених дюкерів навіть після протягання в них полімерних рукавів. Одночасно, отримані результати доводять високу надійність тунельного дюкеру щодо стабільності в умовах технічної експлуатації та в разі військових (диверсійних) загроз, показують доцільність переведення розглянутої ділянки міської інфраструктури в підземний простір.

Альтернативою трубним дюкерам є запропонований авторами тунельний дюкерний перехід Дніпра в шарі пісків і супісків на глибині 20–25 м від дна річки (рис. 3.44), що запобігає будь-яким екологічним ризикам.

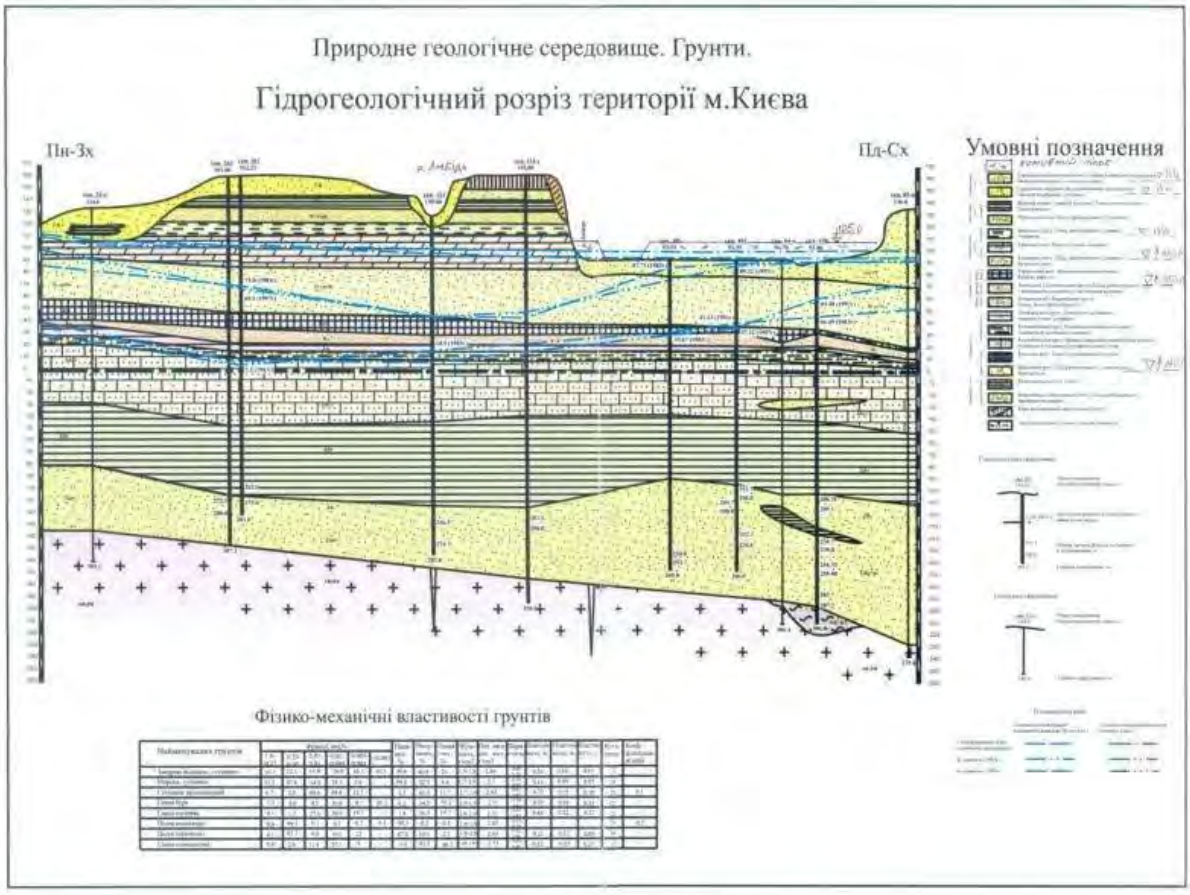
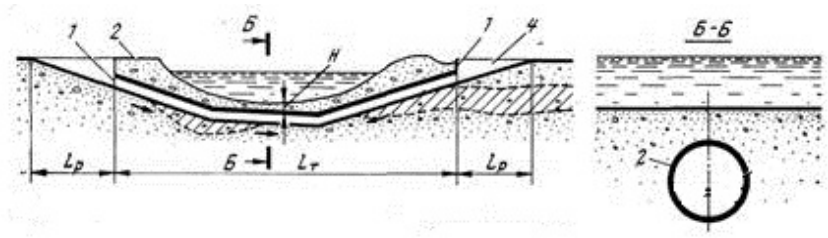
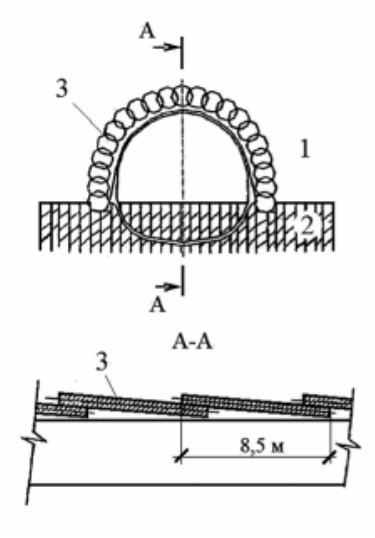


Рис. 3.44 – Геологічна будова правобережного Києва та русла Дніпра

Дюкерний тунельний перехід (рис. 3.45) доцільно розмістити південніше трубного дюкера №6 (див. рис. 3.43) з підведенням до прилеглої лінії головного каналізаційного колектора м. Києва. Варіанти спорудження тунельних переходів можуть передбачати проведення тунелю щитовим способом діаметром 4 або 5 м.
В обох випадках буде застосовуватись кругла форма перерізу. Довжина тунелю – 1050 м, що включає частину під водним дзеркалом (бл. 850 м), ділянку до головного каналізаційного колектора на правому березі (бл. 150 м) і ділянку до сполучення з трубопроводом на Бортницьку станцію аерації (лівий берег).



а)



б)

Рисунок 3.45 – Концепт тунельного дюкеру: а – повздовжий переріз;
б – поперечний переріз

Як базове кріплення рекомендований монолітний бетон, що передбачає використання інвентарної опалубки. Для запобігання можливих ускладнень щитової проходки в умовах слабких обводнених грунтів передбачається усебічне екранування тунелю шляхом створення ґрунтоцементної оболонки навколо виробки. Для цього вздовж тунелю по будуть буритися випереджаючі свердловини і за допомоги струменевої технології утворюватися ґрунтоцементні елементи (див. рис. 3.45, позиція 3).

Важливим питанням є порівняння економічних показників реконструкції (санації) трубних дюкерів і тунельного дюкеру. Загальна кошторисна вартість реконструкції з використанням полімерних рукавів «Aarsleff» склала за проектом 985 млн. грн. ($36,5 млн.). Як свідчить світовий та український досвід підземного

будівництва [11], вартість 1000 м тунелів зазначених діаметрів (4–6 м) знаходиться в межах $20–35 млн. (в залежності від геологічних умов і прийнятої технології). Таким чином вартість будівництва тунельного дюкера не перебільшить ціни запланованої реконструкції. При цьому тунельний дюкер повністю виключить ризики потрапляння стічних вод у Дніпро при будь яких природних, техногенних чи військових (терористичних) загрозах.

Слід зауважити, що в даний момент запланована реконструкція трубних дюкерів вже ведеться. Навіть у випадку, коли вона буде успішно завершена, потреба в будівництві тунельного дюкера не зменшиться, оскільки використання полімерних рукавів «Aarsleff» є лише тимчасовою мірою захисту трубопроводів. Наявність можливості одночасної експлуатації реконструйованих трубних і нового тунельного дюкерів вперше дасть можливість ефективного і безпечного перепуску стічних вод з правого на лівий берег, забезпечить резервні потужності і відкриє можливості збільшення обсягів транспортування стічних вод, стане надійним запобіжником від катастрофічних наслідків руйнування трубних дюкерів.

ВИСНОВКИ

Розроблено системний підхід до моделювання і сценарного аналізу планування розвитку інфраструктури мегаполісу в умовах екологічних, техногенних і терористичних загроз, що базується на спільному застосуванні методологій передбачення, когнітивного моделювання та фрактального аналізу. Вперше пропонується використовувати зазначені методології спільно: на першому етапі застосовувати методологію передбачення і фрактального аналізу, отримані результати використовувати в якості вихідних даних на другому етапі – для когнітивного моделювання, що дозволяє запропонувати науково обгрунтовану стратегію реалізації пріоритетної альтернативи сценарію планування розвитку інфраструктури мегаполісу.

Запропоновано проводити розв'язання задач передбачення на основі поглибленої аналітики слабкоструктурованих даних щодо техногенних, екологічних та економічних процесів. Поєднання методик та прийомів обробки великих об'ємів неструктурованої інформації з методологіями системного і сценарного аналізу забезпечить можливість довгострокового передбачення поведінки складних систем різної природи на основі використання фактів, відношень, показників, отриманих як традиційним для передбачення експертним оцінюванням, так і шляхом поглибленого аналізу великого корпусу текстових документів. Це дає змогу адекватно і своєчасно розробляти і адаптувати стратегії в умовах постійного зростання об'ємів актуальної інформації і змін у навколишньому світі, при цьому враховуючи існування суттєвих невизначеностей та багатофакторних ступенів і рівнів ризику, що гарантує сталий розвиток досліджуваної системи відповідно до умов розвитку, обраних у сценаріях ключових технологій та галузей.

Розроблена морфологічна модель розвитку підземної інфраструктури великих міст (зокрема протяжних підземних споруд транспортного призначення)

для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору, яка відкриває можливості для системного аналізу транспортної інфраструктури мегаполісу і оцінки доцільності передачі частини транспортних функцій автомобільним тунелям на територіях запланованих трас. Запропонована методика врахування змінності альтернатив параметрів вздовж траси тунелю для формування експертних оцінок. Побудовані морфологічні таблиці інженерно-геологічних факторів ділянки будівництва тунелю (10 параметрів, сумарно 38 альтернатив), елементів рішення щодо траси тунелю (6 параметрів, сумарно 23 альтернативи), параметрів впливу на структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори (8 параметрів, сумарно 31 альтернатива) і результатів аналізу цього впливу (6 параметрів, сумарно 22 альтернативи), і відповідні матриці взаємозв'язків між параметрами цих таблиць.

На основі експертного опитування щодо взаємозв'язків і зв'язків між параметрами морфологічних таблиць (сумарно близько 1 000 питань) побудована морфологічна модель оцінювання ділянок потенційного будівництва тунелів. Вхідними даними для моделі є оцінки альтернатив конкретної ділянки будівництва тунелю, кількість таких оцінок для одного об'єкта складає 69 питань.

Розроблену модель протестовано на двох ділянках будівництва тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва. Для обраних ділянок проведені два паралельні експертні опитування і отримані результати розрахунку модифікованим методом морфологічного аналізу. Результати проаналізовані, представлені у вигляді діаграм та графіків, і демонструють достатньо високу адекватність і наочність моделі в умовах відсутності точної, чіткої, достовірної інформації.

Отримані результати використовувались в якості вихідних даних для імпульсного когнітивного моделювання, що дозволило побудувати сценарії розвитку в динаміці процесу і запропонувати науково обґрунтовану стратегію реалізації пріоритетного сценарію.

Для оцінки складності ділянок будівництва тунелів з метою оцінки поточної ситуації та порівняння запропонованих варіантів рішень для підтримки їх прийняття. застосовані та адаптовані методи фрактального аналізу до інфраструктури території тунелів, включаючи обчислення їх фрактальної розмірності та її інфраструктури.

Розроблені моделі враховують як інженерно-геологічні, так і структурно-функціональні фактори розвитку об’єктів підземної інфраструктури, відображають їх характеристики з точки зору екологічних, техногенних, безпекових ризиків. Модель дозволяє врахувати невизначеності, спричинені рядом факторів:

– з інженерно-геологічної точки зору тунель є протяжним об’єктом, що може проходити через суттєво різні ділянки геологічного середовища. Крім того, точна оцінка всіх факторів впливу потребує суттєвих затрат часу і ресурсів, пов’язаних з проведенням інженерних і геологічних робіт і вимірювань, що не завжди є економічно доцільним на стадії прийняття рішення;

– зі структурно-функціональної точки зору потенційне будівництво тунелю впливає на досить велику частину міського простору, яка суттєво виходить за межі власне ділянки над трасою тунелю. У межах цього простору структурно-функціональні характеристики можуть значно відрізнятися, причому в їх оцінюванні присутній суб’єктивізм, пов’язаний як з якісною природою більшості з цих характеристик, так і з визначенням меж території, на яку вплине потенційне будівництво тунелю.

Дослідження аналогічних задач методом морфологічного аналізу авторам невідомі, однак є ряд досліджень зарубіжних вчених цим методом щодо аналізу ризиків в інших сферах людської діяльності. Основною перевагою розробленого авторами продукту є використання модифікованого методу морфологічного аналізу, який дозволяє отримати науково обґрунтовані кількісні показники і представити результати у наочному вигляді, доступному для осіб, що приймають

рішення, тоді як існуючі аналоги використання методу зводяться, в основному, до структурованого перебору варіантів і надання вербальних рекомендацій.

Застосована методика вперше дозволяє оцінити різноманітні ризики, імовірність реалізації негативних сценаріїв та додаткові витрати, з ними пов'язані, ще на передпроєктній стадії спорудження підземних об'єктів. Це дає в руки інвесторів та міських державних адміністрацій ефективний інструмент управління ризиками та інвестиціями при освоєнні підземного простору мегаполісів. Запропонований інструментарій передбачення і сценарного аналізу планування розвитку підземної інфраструктури мегаполісу може бути використаний для аналізу, моделювання, прогнозування соціальних, екологічних, економічних процесів, для оцінювання ризиків в умовах екологічних і техногенних загроз. Розроблені інструменти дозволяють зменшити необхідні часові, фінансові і людські ресурси для стратегічного планування і прийняття рішень у складних системах з наявністю людського фактора, таким чином підвищуючи конкурентоспроможність для організацій різних рівнів і держави в цілому.

Розроблена методика та інструментарій можуть бути використані для побудови стратегічних майстер-планів розвитку «підземного Києва» та інших великих міст України. За результатами проєкту планується розробити «Рекомендації з мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору м. Києва», які будуть направлені в КМДА, Інститут Генерального плану м. Києва, в Академію будівництва України та в Будівельну палату України.

Поширення результатів дослідження в наукових і фахових виданнях та серед громадськості, а також в обласних осередках Академії будівництва України сприятиме застосуванню системної методології розвитку підземної інфраструктури у великих промислових містах країни (Харків, Дніпро, Кривий Ріг, Запоріжжя, Маріуполь та ін.) де екологічні питання та техногенні загрози посилюються концентрацією виробничих потужностей, а держадміністрації,

органи самоврядування та інвестори потребують дієвих інструментів управління ризиками та інвестиціями для вирішення урбаністичних проблем.

Згідно з ідеєю переведення в підземний простір найбільш вразливих або екологічно загрозливих ділянок інфраструктурних мереж було виділено об'єкти, які мають вагомий вплив на зменшення екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору і складають основу розглянутих мережевих моделей (на прикладі м. Києва): вісім автомобільних тунелів, три з них – під Дніпром, тунельний дюкер під Дніпром для перепускання стічних вод з правобережного Києва до Бортницької станції аерації, тунельний перехід Дніпра кільцевою магістраллю в районі м. Українка, підземна автомагістраль під Набережно-Хрещатицькою вулицею від Поштової площі до Церкви Миколи Чудотворця (Поділ).

Проаналізовані можливі критичні ситуації і фактори природного, техногенного та терористичного характеру, які можуть становити певну небезпеку для міської інфраструктури. Для морфологічного аналізу були прийняті шість основних альтернатив типів небажаних подій: вибух; пожежа; зсуви, провали та просідання ґрунту; погодні катаклізми; експлуатаційні пошкодження та/або руйнування конструкцій об'єкту; порушення функціонування без конструктивних пошкоджень. Виділено 4 альтернативних походження для небажаних подій: антропогенне зі злим умислом (тероризм, диверсії, бойові дії); антропогенне без злого умислу або «людський фактор» (помилки, недбалість, недотримання норм будівництва або експлуатації); технічне, технологічне (технічні відмови, поламки, руйнування з причин корозії тощо); природне (атмосферні, гідросферні й літосферні збурення, стихійні лиха). Розглядалися п'ять альтернатив масштабу 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.

Опис наслідків небажаних подій включав параметри: цілісність об’єкта/його елементів; здатність до функціонування; можливість передачі функцій іншим об’єктам; час відновлення функціонування; кількість постраждалих; порушені умови життєдіяльності; розмір матеріальних збитків; екологічні наслідки. Це дозволило провести усебічну системну оцінку наслідків небажаних подій.

Створена морфологічна модель і розроблені морфологічні таблиці для оцінки небажаних подій та їх наслідків для урбаністичних об’єктів. На їх основі проведено тестування об’єктів критичної інфраструктури – трубних (існуючих) та тунельного (запропонованого) дюкерів для транспортування стічних вод з Правого берега Дніпра на Лівий до Бортницької станції аерації. Порівняння цих двох об’єктів при реалізації небажаних подій свідчить про значні переваги тунельного дюкера над трубами, прокладеними по дну Дніпра за параметрами цілісності об’єкта та його елементів, здатності до функціонування, часу відновлення функціонування, розміру матеріальних збитків та особливо екологічних наслідків (приміром тунельний дюкер з імовірністю 0,894 виключає екологічні проблеми при будь яких небажаних подіях, тоді як для труб ця імовірність дорівнює нулю). У порівнянні сценаріїв можна відмітити, що умисно створені небажані події (диверсії, терористичні акти) в цілому можуть викликати для критичної інфраструктури більш суворі наслідки і завдати значно більших збитків, ніж природні та техногенні небажані події. Отримана методика та інструментарій модифікованого морфологічного аналізу можуть бути застосовані для порівняння будь-яких інших об’єктів інфраструктури й закладають основи системної стратегії розвитку міського підземного простору з метою мінімізації військових (диверсійних), техногенних і природних загроз.

Розвинуто стратегію використання підземного простору м. Києва у середньостроковій перспективі, яка поєднує напрацьовані плани розвитку підземної інфраструктури (зокрема закладені в Генеральному плані розвитку міста Києва до 2025 р., Комплексній схемі транспорту міста Києва на період до 2020 р.

та ін.) з обґрунтованими авторами за екологічними та безпековими критеріями новими об’єктами (тунельний дюкер під Дніпром, підземна ділянка автомагістралі під вул. Набережно-Хрещатицька та ін.). З цих позицій проведена системна оцінка пріоритетності будівництва підземних об’єктів (приміром у першу чергу слід вводити тунель №5 Генплану). Київський метрополітен, особливо його станції глибокого закладання (31 станція), слід розглядати як споруди подвійного призначення й планувати використовувати у разі військових загроз як сховища цивільної безпеки. Відповідно облаштований і переведений у режим сховища цивільної безпеки Київський метрополітен може захистити до 500 тис. осіб.

Для оцінки складності районів, де планується будівництво тунелів, залучено фрактальний аналіз. Розроблено інструментарій для допомоги у підтримці прийняття рішень, що включає в себе отримання мап високої роздільної здатності, екстракцію районів, що відповідають досліджуваним об’єктам, автоматичну обробку мап та виділення з них забудови та надземною інфраструктури, обчислення метрики складності для підтримки прийняття рішень. Для оцінювання фрактальної складності були використані Google Maps високої роздільності, виділені відповідні райони та зроблена обробка зображень для виділення об’єктів, для яких розраховується складність шляхом застосування клітинкового методу (box counting). Найбільша складність забудови та транспортної інфраструктури є над об’єктами №2 (D = 1.79), №7 (D = 1.81) та №8 (D = 1.82). З іншого боку, найменша складність є над об’єктом №3 (D = 1.48). З точки зору обчисленої нами складності, об’єкти №8, №7 та №2 мають високий пріоритет для реалізації в порівнянні з іншими об’єктами у силу високої складності надземної забудови та інфраструктури. Щодо вибору технології реалізації, то з точки зору обчисленої складності, для об’єктів №2, №6, №7 та №8, саме підземні тунелі є найбільш доцільними (у силу високої складності забудови та інфраструктури), а для об’єктів №3 та №4 можна розглядати надземні альтернативи (у силу низької складності забудови та інфраструктури).

З залученням текстової аналітики виконано збір переліку джерел з тематики інфраструктури великих міст.

Отримані на етапі передбачення результати застосовувались як вихідні дані для імпульсного когнітивного моделювання, що надало можливість досліджувати проблему при динамічних навантаженнях. Виконано аналіз структур когнітивних моделей, що є одним з найважливіших етапів дослідження соціально-економічних, екологічних, політичних і т.п. систем, що відносяться до класу складних. Вивчення структури важливо для виявлення закономірностей існування і розвитку систем, виявлення таких особливостей і недоліків досліджуваних структур, які вимагають підвищеної уваги не лише дослідника, а й особи, що приймає рішення в реальній складній системі. Структурний аналіз також необхідний для вирішення задачі структурного синтезу, яка виникає при розробці практично будь-яких систем на всіх етапах, починаючи з етапу передпроєктних досліджень, ескізного проектування і закінчуючи випуском конструкторської документації. Для оцінювання цілісності об’єкту запропоновано використовувати методику симпліціального аналізу зв'язності структур (аналізу q-зв'язності), що дозволяє судити про зв'язності системи більш глибоко, ніж традиційні дослідження зв'язності графа, і впорядковувати оцінювані компоненти в порядку зростання або зменшення зв'язності.

Проведено імпульсне когнітивне моделювання планування раціональних конфігурацій побудови запропонованого авторами тунельного дюкеру під Дніпром для перепуску стічних вод з правобережного Києва до Бортницької станції аерації та обгартування доцільності його побудови з порівнянням існуючих трубних дюкерів. При цьому в якості збурюючих факторів враховувались можливі дії небажаних подій – як природні стихійні лиха та катастрофи, так і події техногенного або антропогенного походження (зокрема – зі злим умислом: військові дії, терористичні акти).

Результати проведеного чисельного експерименту імпульсного когнітивного моделювання для тунельних та трубних дюкерів в умовах подій антропогенного (бойові дії, диверсія, тероризм) та природного походження (зсуви) показали, що в результаті дії злого умислу (бойові дії, тероризм), суттєво, більш ніж на 80%, зменшується здатність до функціонування трубних дюкерів порівняно з тунельними, до 97.76% досягає різниця в порівнянні негативних наслідків життєдіяльності, а також на 96.43% екологічних та 89.67% економічних наслідків для трубних дюкерів. За умов природного походження розглядалися зсуви. При цьому здатність до функціонування тунельних дюкерів на 41.5% більш надійна, ніж трубних дюкерів. В той же час різниця наслідків для тунельних і трубних дюкерів для більш суттєвих факторів, а саме: життєдіяльності, екологічних та економічних наслідків складають відповідно 88.1%, 65.58%, 92.52%.

Проведені чисельні експерименти при залученні імпульсного когнітивного моделювання показали доцільність заміни трубних дюкерів на тунельні з точки зору безпеки та якості життя людини. Розроблений концепт тунельного дюкера свідчить про доцільність і технологічність його спорудження навіть у випадку ускладнень гідрогеологічних умов, причому вартість його будівництва співставна з вартістю реконструкції трубних дюкерів з використанням полімерних рукавів «Aarsleff» (принятого АК «Київводоканал»).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. World Urbanization Prospects 2018: Highlights. United Nations. New York, 2019// Режим доступу: https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf.

2. Кучерявий В.П. Урбоекологія. – Львів: Світ, 2001. – 440 с.; Елисеев Д.О. Риски в современных мегаполисах: виды, особенности, специфика// Региональная экономика и управление. – №4 (52), 2017.

3. Регіональна доповідь про стан навколишнього середовища м. Києва за 2017 рік. – Київ: КМДА, 2018. – 128 с. – Режим доступу: https://ecodep.kyivcity.gov.ua/files/2019/1/22/REG_DOP_2017.pdf.

4. Underground Engineering for Sustainble Urban Development/ P.H. Gilbert and others. – Washington: The National Academies Press, 2013.

5. A. R. Berkowitz, C. H. Nilon, K. S. Hollweg. Understanding Urban Ecosystems. – New York: Springer, 2003.

6. Голубев Г.Е. Подземная урбанистика и город/ Г.Е. Голубев. – М.: МИКХиС, 2005. – 124 с.

7. Vähäaho I. Underground space planning in Helsinki // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. № 6.

8. Картозия Б.А. Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 1. – С. 615 – 629.

9. Панкратова Н.Д., Савченко І.О. Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування. – К.: Наукова думка. – 2015. – 245 с.

10. Панкратова Н.Д. Системний аналіз. Теорія та застосування. – К.: Наукова Думка. – 2018. – 348 с.

11. Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій. – К.: Наукова думка, 2020. – 152 с.

12. Sterling, R., H. Admiraal, N. Bobylev, H. Parker, J.P. Godard, I. Vähäaho, X. Shi, and T. Hanamura. Sustainability issues for underground spaces in urban areas. Proceedings of ICE. – Urban Design and Planning. Volume 165, Issue 4. – December 2012, – P. 241–254.

13. Owen C. L., Bezerra C. Evolutionary Structured Planning. A Computer-Supported Methodology for the Conceptual Planning Proces. In JS Gero (ed.). Artificial Intelligence in Design'00. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, – 2000. – P. 287–307.

14. Левченко А.Н. О новом направлении научных исследований в строительной геотехнологии/ Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). №2, 2007. – С.15–21.

15. Картозия Б.А. Освоение подземного пространства – глобальная проблема науки, производства и высшего горного образования /Материалы конф. «Перспективы освоения подземного пространства, 2010. – С.12-26.

16. Картозия Б.А. Строительная геотехнология как составная часть горных наук и ее роль в решении проблемы освоения подземного пространства, Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) МГГУ, Выпуск 9 –13 1993 г.

17. Картозия Б.А. Основы освоения подземного пространства,-М, Отдел печати МГГУ, 2009.

18. Инновационное развитие социо-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования //Коллективная монография под редакцией Гореловой Г.В., Панкратовой Н.Д. Наукова думка. – 2015. – 464с.

19. Pankratova N, Savchenko I, Haiko H., Kravets V. System approach to planning urban underground development. Int. Journal "Information Content and Processing" 6(1) – 2019.– P. 3-17.

20. Pankratova N.,. Gayko G., Kravets V., Savchenko I. Problems of Megapolises Underground Space System Planning. Journal of Automation and Information Sciences 48,4. – 2016. – P. 32-38.

21. Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. System analysis: Theory and Applications. Springer. – 2007. – 475 p.

22. Куликова Е.Ю., Корчак А.В., Левченко А.Н. Стратегия управления рисками в городском подземном строительстве - М.: Изд-во МГГУ, 2005, 207 с.

23. Pankratova N., Savastiyanov V. Assessment of situations in the field of social disasters basing on the methodology of foresight and textual analytics // Proceedings of the 2019 IEEE Second International Conference IEEE UKRCON. –2019. – P. 1207–1210.

24. Панкратова Н.Д., Недашківська Н.І. Моделі і методи аналізу ієрархій:Теорія. Застосування Навчальний посібник. Київ, НТУУ «КПІ». -2010. – 372 с.

25. Панкратова Н.Д., Малафєєва Л.І. Метод Делфі. Методологія та застосування // Наукова думка. Київ. – 248 с.

26. Pankratov V. Development of the approach to formalization of vector's indicators of sustainable development // International Journal «Information Technologies & Knowledge». ITHEA. SOFIA, — 2014. — V.8, №.3. — P.203–211.

27. Pankratova N.D., Pankratov V.A. Strategy of underground urbanism development based on foresight and cognitive modeling methodologies // Mathematical support and software for intelligent systems (MSSIS-2020) Праці XVIII Міжнародної науково-практичноаї конференції «Математичне та пр.ограмне забезпечення інтелектуальних систем». 18–20 листопада, 2020, Дніпро. С. 9–10.

28. Панкратова Н.Д., Горелова Г.В., Панкратов В.А. Инструментарий планирования подземной инфраструктуры мегаполиса на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования // Питання прикладної математики та математичного програмування. – Дніпро.2020. С.109–121.

29. N.D. Pankratova, G.V.Gorelova, V.A. Pankratov Study of the Plot Suitability for Underground Construction: Cognitive Modelling // ISDMCI 2020: Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. – Pp. 246–264. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-3_16.

30. Генеральний план розвитку м. Києва та його приміської зони до 2025 року (проект)/ Режим доступу: https://kga.gov.ua/generalnij-plan/genplan2025.

31. Елисеев Д.О. Риски в современных мегаполисах: виды, особенности, специфика// Региональная экономика и управление. – №4 (52), 2017.

32. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов / Е.М. Лобанов М.: Стройиздат, 1990 . – 240 с.

33. Вучек, В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / В.Р. Вучек. - М.: Территория будущего, 2011. - 576 с.

34. Котиков Ю. Г. Основы системного анализа транспортных систем: учеб. пособие // Ю. Г. Котиков. – СПб.: СПбГАСУ, 2001. – 264 с.

35. Гайко Г.І. Система автомобільних тунелів як спосіб розв’язання транспортних і екологічних проблем мегаполісу/ Г.І. Гайко, В.П. Булгаков, М.О. Сіверин// Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. Вип. 30. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 196 – 206.

36. Гайко Г.І., Кравець В.Г., Булгаков В.П., Гайко Ю.І. Транзитноорієнтована природничо-технічна геосистема «геоурбаністика – інженерно-геологічне середовище». – Вісник НТУ «КПІ». Серія «Гірництво». – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – Випуск 29. – С. 18-24.

37. Лебедев А. Умный транспорт как часть экосистемы технологий умного города//Системы безопасности, 2019, № 4. – С.26-29.

38. Маковский Л.В. Вентиляция автодорожных тоннелей/ Л.В. Маковский, Ю.В. Трофименко, Н.А. Евстигнеева. – М.: МАДИ (ГТУ), 2009. – 148 с.

39. Savchenko, I.O. Estimating the Solution Sensitivity in Application of the Modified Morphological Analysis Method // Cybernetics and Systems Analysis. - September 2016, Volume 52, Issue 5, pp 782–790. doi:10.1007/s10559-016-9879-1.

40. Савченко І.О. Методологічне і математичне забезпечення розв'язання задач передбачення на основі модифікованого методу морфологічного аналізу // Системні дослідження та інформаційні технології. − 2011. – №3. – С. 18−28.

41. H.I.Haiko, I.O.Savchenko, I.O.Matviichuk Development of a morphological model for territorial development of underground city space // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, Vol. 3, 2019. – P. 92–98. doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/14.

42. 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.

43. N. D. Pankratova and N.I.Nedashkovskaya. Evaluating multifactor risks under conceptual uncertainty // Cybernetics and Systems Analysis. – 2009. – Vol. 45 (2). – P. 223-231.

44. Natalya D. Pankratova, Nadezhda I. Nedashkovskaya. Method for Processing Fuzzy Expert Information in Prediction Problems. Part I // Journal of Automation and Information Sciences. – 2007. – Vol. 39. Issue 4. – P.22 – 36.

45. Natalya D. Pankratova, Nadezhda I. Nedashkovskaya. Method for Processing Fuzzy Expert Information in Prediction Problems. Part II // Journal of Automation and Information Sciences. – 2007. – Vol. 39. Issue 6. – P.30 – 44.

46. N. Pankratova, N. Nedashkovskaya. The Method of Estimating the Consistency of Paired Comparisons // International Journal «Information Technologies and Knowledge», vol.7, №4. – 2013. – P.347-361.

47. N. Pankratova, N. Nedashkovskaya. Spectral coefficient of consistency of fuzzy expert information and estimation of its sensitivity to fuzzy scales when solving foresight problems // International Journal «Information Technologies and Knowledge», vol.6, №4. – 2012. – P.316-329.

48. Nataliya D. Pankratova, Nadezhda I.Nedashkovskaya. A Decision Support System for Evaluation of Decision Alternatives on Basis of a Network Criteria Model // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 29 May–2 June 2017. – PP.830 – 835.

49. N. Pankratova, N. Nedashkovskaya. Estimation of decision alternatives on the basis of interval pairwise comparison matrices // ICA. – 2016. – Vol.7., No 2. – P. 39 – 54. DOI: 10.4236/ica.2016.72005.

50. N.Pankratova, N.Nedashkovskaya. Sensitivity analysis of a decision-making problem using the Analytic Hierarchy Process // International Journal «Information Theories and Applications» – 2016. – Vol.23(3). – P. 232 – 251.

51. N. Pankratova, N. Nedashkovskaya. Methods of evaluation and improvement of consistency of expert pairwise comparison judgements // International Journal «Information Theories and Applications». – 2015. – Vol. 22, №3. – P.203-223.

52. Korobov M.: Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages // Analysis of Images, Social Networks and Texts, pp 320-332 (2015).

53. Rehu˜rek, R., & Sojka, P. Software framework for topic modelling with large corpora. LREC, 2010.

54. Chakraborty, G., M. Pagolu, S. Garla. 2013. Text Mining and Analysis; Practical Methods, Examples, and Case Studies Using SAS®. SAS Institute Inc.

55. Згуровский М.З., Панкратов В.А. Стратегия инновационного развития региона на основе синтеза методологий предвидения и когнитивного моделирования //System Research&Informatio Technologies. №.2. –2014. - С. 7 – 17.

56. Casti, J.Connectivity, Complexity, and Catastrophe in Large-scale Systems. A Wiley – Interscience Publication International Institute for Applied Systems Analysis. JOHN WILEY and SONS. Chichester – New York – Brisbane – Toronto. –1979.

57. Roberts F. Graph Theory and its Applications to Problems of Society, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia. – 1978.

58. Atkin R. H.: Combinatorial Connectivies in Social Systems. An Application of Simplicial Complex Structures to the Study of Large Organisations, Interdisciplinary Systems Research. – 1997.

59. Atkin R. H., Casti J. Polyhedral Dynamics and the Geometry of Systems. RR-77-International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. –1977.

60. Pankratov V. Application of cognitive modeling to solving of foresight problems // XIV Miedzynarodowe Sympozjum “Geotechnika-Geotechnics 2012”. Materialy Naukowe, Gliwice-Ustron, 23-26 pazdziernika, 2012. – P.111–118.

61. Панкратов В.А. Побудова стратегії розвитку соціо-економічних систем на основі синтезу методологій передбачення та когнітивного моделювання //Інформаційні технології, економіка та право: стан та перспективи розвитку. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Вип. 12. Чернівці. –2015. – С. 194-196.

62. Gorelova G.V., Pankratova N.D., Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems //18th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability TECIS 2018Volume 51, Issue 30, 2018, Baku, Azerbaijan, 13–15 September 2018 Pages 145-149. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.264.

63. Pankratova N.D., Gorelova G.V., Pankratov V.A. Strategy for the Study of Interregional Economic and Social Exchange Based on Foresight and Cognitive Modeling Methodologies //Modern Machine Learning Technologies and Data Science Workshop Proceedings of the 8th International Conference on Mathematics. Information Technologies. Education”, MoMLeT&DS-2019 Shatsk, Ukraine, June 2-4, 2019. P136–147.

64. Pankratova N. D., Gorelova G.V., Pankratov V.A System Approach to Assessing of the Quantitative and Qualitative Characteristics of Information. CSIS'2019: Proceedings of the XI International Scientific Conference Communicative Strategies of the Information Society. October 2019, Article No.: 4, pp 1–6https://doi.org/10.1145/3373722.3373768.

65. Gorelova G.V., Pankratova N.D., Strategy of complex systems development based at the synthesis of methodologies foresight and cognitive modelling //Proceedings of IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing conference (SAIC) 08-12 October, 2018 Kyiv, Ukraine. – P. 13–19.

66. Gorelova G.V., Pankratova N.D., Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems //18th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability TECIS 2018. Volume 51, Issue 30, 2018, Baku, Azerbaijan, 13–15 September 2018 Pages 145-149 https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.264.

67. Pankratov V. To the estimation of cognitive maps sustainability // Intern. Conf“X SzkolaGeomechaniki2011”. Materialy Naukowe, Gliwice-Ustron, 18–21 pazdziernika, 2011. – V.2. – P.119–128.

68. Гайко Г.І., Захарченко П.В. Перспективи будування тунельних переходів Дніпра// Підводні технології. – 2016. – № 4. – С. 72 – 79.

69. B. B. Mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature, San Francisco, CA: W.H. Freeman and Company, 1982.

70. D. Barbara, “Chaotic Mining: Knowledge Discovery Using the Fractal Dimension,” 1999 ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery, Philadelphia, USA, May 30.

71. D. Barbará and P. Chen, “Using the fractal dimension to cluster datasets,” Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, Aug. 2000, pp. 260-264, https://doi.org/10.1145/347090.347145.

72. A. Vislenko, “Possibilities of Fractal Analysis Application to Cultural Objects,” Observatory of Culture, 2015, No. 2, pp. 13-19.

73. C. Song, S. Havlin, and H.A. Makse, “Origins of fractality in the growth of complex networks,” Nature Physics, Vol. 2, 2006, pp. 275-281, https://doi.org/10.1038/nphys266.

74. K. L. Uahabi and M. Atounti, “Applications of fractals in medicine,” Annals of the University of Craiova, Mathematics and Computer Science Series, Vol. 42, 2015, pp. 167-174.

75. G. Shen, “Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas,” International Journal of Geographical Information Science, Vol. 16, No. 5, 2002, pp. 419-437.

76. R. Giovanni and M. Caglioni, “Contribution to fractal analysis of cities: A study of metropolitan area of Milan,” Cybergeo, 2004, https://doi.org//10.4000/cybergeo.3634.

77. Y. Chen, J. Wang, and J. Feng, “Understanding the fractal dimensions of urban forms through spatial entropy,” Entropy, Vol. 19, No. 11, 2017, https://doi.org/10.3390/e19110600.

78. Гайко Г.І., Савченко І.О., Вапнічна В.В. Морфологічна модель розвитку підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору//Геоінженерія. – 2020. – №4. – С. 7–18.

79. N.D. Pankratova, G.V.Gorelova, V.A.Pankratov Study of the Plot Suitability for Underground Construction: Cognitive Modelling // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021, 1246 AISC. P. 246–264.

80. N.D. Pankratova, G.V.Gorelova, V.A.Pankratov Strategy for Simulation Complex Hierarchical Systems Based on the Methodologies of Foresight and Cognitive Modelling // Advanced Control Systems: Theory and Applications. River Publishers Series in Automation, Control and Robotics. Chapter 9. 2021. P. 257-288.

81. Pankratova N.D., Pankratov V.A. Modeling of scenarios for development planning of underground infrastructure for large cities in conditions of uncertainty and multifactorial risks. 16 міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС '2021 " 28 червня - 01 липня, м Чернігів 2021 р Україна. С.15-19.

82. Axelrod R.M. The Structure of decision: The Cognitive Maps of Political Elites − Princeton, NJ, Princeton University Press, 1976. − 404 p.

83. Avdeeva ZK, Kovriga SV, Makarenko DI, Maksimov VI. Cognitive approach to management // Management problems – №3. – 2007 – P. 2-8.

84. Kovriga S.V. Methodological and analytical foundations of the cognitive approach to SWOT-analysis // Management problems. – 2005. – No. 5. – P. 58–63.

85. Orlov A.I. Decision theory // M .: Exam. - 2006. -473 p.

86. The human factor in management / Ed. N.A. Abramova, K.S. Ginsberg, D.A. Novikov. - M.: KomKniga, 2006.- 496 p.

87. Casti J.L. Polyhedral Dynamics - II: Geometrical Structure as a Basis for Decision Making in Complex Systems, IIASA Research Memorandum RM-75-034, 1975.

88. Casti J.L., Karlqvist A. Complexity, Language, and Life: Mathematical Approaches, Springer-Verlag (Heidelberg), 1985.

89. Zakharova E.N. Polyhedral analysis of the structural properties of complex systems / Economic and institutional research. - No. 1 (17), 2006. - P. 110-127.

90. Barcelo H., Kramer X., Laubenbacher R., Weaver C. Foundations of Connectivity Theory for Simplicial Complexes, Department of Mathematical Sciense, New Mexico, 1998.

91. Elasticsearch Назва з екрану – 01.07.2021. Режим доступу: https://www.elastic.co

92. spaCy Назва з екрану – 01.07.2021. Режим доступу: https://spacy.io

93. Ehrlinger, Lisa; Wöß, Wolfram (2016). Towards a Definition of Knowledge Graphs (PDF). SEMANTiCS2016. Leipzig: Joint Proceedings of the Posters and Demos Track of 12th International Conference on Semantic Systems - SEMANTiCS2016 and 1st International Workshop on Semantic Change & Evolving Semantics (SuCCESS16). pp. 13–16.

94. Roberts F.S., “Discrete mathematical models with application to social, biological and environmental problems”. Prentice-Hall, Inc. Englewoo Cliffs, New Jersey, 1976. − 496 p.

95. Козлов К.П. Київський метрополітен: Хронологія. Події. Факти. – К.: ВАРТО, 2011. – 256 с.

96. Генеральний план м. Києва. Основні положення. – Київ: Інститут генерального плану м. Києва, 2011.

97. Бовкунович М.А., Гайко Г.І. Аналіз конструктивних типів каналізаційних колекторів для умов правобережного Києва// Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики. Зб. наук. праць. Вип. 4. – Київ: ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського 2021. – С. 34-38.

98. Гайко Г.І., Савченко І.О. 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.

ПЕРЕЛІК НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ВИДАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Панкратова Н.Д., Горелова Г.В., Панкратов В.А. Инструментарий планирования подземной инфраструктуры мегаполиса на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования // Питання прикладної математики та математичного програмування. – Дніпро.2020. С.109–121. (Гореловій Г.В. належать розробки з теоретичних питань з когнітивного моделювання)
2. 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» – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, випуск 4, 2020. – С. 7–18. (Вапнічній В.В. належать розробки щодо зв’язку факторів геологічного середовища з екологічними параметрами)
3. Pankratova N.D., Pankratov V.A. Strategy of Underground Urbanism Development Based on Foresight and Cognitive Modeling Methodologies // XVIII міжнародна науково-практична конференція «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (МПЗІС-2020), 18–20 листопада 2020 року, Дніпро, Україна. – С. 9–10.
4. I. Savchenko, "New Approach for Processing Cross-Consistency Matrix in Modified Morphological Analysis Method," 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 167-172. doi: 10.1109/SAIC51296.2020.9239226 (індексується SCOPUS, Web of Science)
5. Hennadii Haiko, Illia Savchenko, Ivan Matviichuk. A Morphological Analysis Method-Based Model of Assessing Territories for Underground Parking Lots// 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent

Computing (SAIC)/ Kyiv, 2020. – P. 173-177. DOI: 10.1109/SAIC51296.2020.9239251 (індексується SCOPUS, Web of Science)

6. A. Malishevsky, "Applications of Fractal Analysis in Science, Technology, and Art: A Case Study on Geography of Ukraine," 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 1-6 DOI: 10.1109/SAIC51296.2020.9239196. (індексується SCOPUS, Web of Science)

2021

1. Pankratova, N., Gorelova, G., Pankratov, V. Study of the plot suitability for underground construction: Cognitive modelling // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021, 1246 AISC, pp. 246–264. DOI: 10.1007/978-3-030-54215-3_16 (індексується SCOPUS) (Гореловій Г.В. належать розробки з теоретичних питань з когнітивного моделювання)
2. Pankratova, N., Gorelova, G., Pankratov, V. Strategy for Simulation Complex Hierarchical Systems Based on the Methodologies of Foresight and Cognitive Modeling // Advanced Control Systems – Theory and Applications (Eds.: Yuriy P. Kondratenko, Vsevolod M. Kuntsevich, Arkadii A. Chikrii, Vyacheslav F. Gubarev), River Publishers, 2021. – P. 257–288. (Гореловій Г.В. належать розробки з теоретичних питань з когнітивного моделювання)
3. Pankratova N.D., Pankratov V.A. Strategy for planning underground infrastructure of large cities in conditions of uncertainty and multifactor risks // XXXVI International Conference “Problems of decision making under uncertainties”, Skhidnytsia, Ukraine, May 11 – 14, 2021. – P. 79–80.
4. Nataliya D. Pankratova, Galina V. Gorelova, Vladimir A. Pankratov, Strategy of underground construction planning based on cognitive modelling methodology // XXVII-th International Conference “Knowledge – Dialogue – Solution”, Varna,

Bulgaria, July 01–10, 2021. – P. 1–10. (Гореловій Г.В. належать розробки з теоретичних питань з когнітивного моделювання)

5. Pankratova N.D., Pankratov V.A. Modeling of scenarios for development planning of underground infrastructure for large cities in conditions of uncertainty and multifactorial risks // 16 міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС '2021 " 28 червня - 01 липня, м Чернігів 2021 р Україна. С. 15–19.
6. 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.
7. Бовкунович М.А., Гайко Г.І. Аналіз конструктивних типів каналізаційних колекторів для умов правобережного Києва // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики», КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, 10-11 червня 2021 р. – С. 34–38. (внесок Бовкуновича М.А. – обгрунтування полімерних конструкцій каналізаційних мереж)
8. Pankratova N.D., Pankratov V.A. Modeling of scenarios for underground construction planning based on foresight and cognitive modeling methodologies //Доповіді НАНУ. № 5. – 2021. 2021. № 5. С. 18–24. https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.05.018
9. Панкратова Н.Д., Гайко Г. І., Савченко І. О. Визначення пріоритетів розвитку підземної інфраструктури мегаполісів на основі системної методології // Науково-технічний журнал «Геоінженерія» – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – випуск 6. – С. 17–27.
10. Панкратова Н.Д., Недашківська Н.І., Гайко Г.І., Білецький В.С. Оцінювання моделей розвитку підземної транспортної інфраструктури методом BOCR з урахуванням екологічних і техногенних ризиків// Вісник Харківського

національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія» (пройшла рецензування, рекомендована до друку в 2021 р.) (внесок Білецького В.С. – обгрунтування факторів екологічного ризику)

11. N.D. Pankratova, G.V.Gorelova, V.A.Pankratov The Strategy of Underground Construction Objects Planning Based on Foresight and Cognitive Modelling Methodologies. In: “System Analysis & Intelligent Computing - Theory and Applications” (Eds.: M.Zgurovsky, N. Pankratova), Springer.2021 (in print) (Гореловій Г.В. належать розробки з теоретичних питань з когнітивного моделювання).
12. H.I. Haiko, I.O. Savchenko, Assessing Territories for Urban Underground Objects Using Morphological Analysis-Based Model In: “System Analysis & Intelligent Computing - Theory and Applications” (Eds.: M.Zgurovsky, N. Pankratova), Springer.2021 (in print).
13. Alexey Malishevsky Fractal Analysis and Its Applications in Urban Environment In: “System Analysis & Intelligent Computing - Theory and Applications”, Chapter (Eds.: M.Zgurovsky, N. Pankratova), Springer.2021 (in print).
14. Pankratova N.D., Savastianov V.V. Application of Classification to Determine the Level of Awareness of the Foresight Process //System Analysis in Engineering and Control. Chapter (Eds.: Prof. Dr. Yuriy S. Vasiliev, Prof. Dr. Nataliya D. Pankratova, Prof. Dr. Violetta N. Volkova, Prof. Dr. Olga D. Shipunova and Prof. Dr. Nikolay N. Lyabakh), Springer, 2021. (in print).
15. Pankratova N.D., Haiko H.I., Savchenko I.O. Morphological model for underground crossings of water objects //System research&Information technology, №4, 2021, p. 78–92. (in print, індексується в SCOPUS). DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.05
16. N.D. Pankratova, G.V. Gorelova, V.A. Pankratov System approach to the study of underground construction objects based on foresight and cognitive modelling methodologies //System research&Information technologies, №1. 2022. (in print,

індексується в SCOPUS) (Гореловій Г.В. належать розробки з теоретичних питань з когнітивного моделювання).

17. Савастьянов В. В. Супроводження процесу передбачення з наявністю слабко структурованих даних засобами текстової аналітики. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.04 Системний аналіз і теорія оптимальних рішень (124–Системний аналіз). Керівник чл.-кор. НАНУ Н.Д. Панкратова– Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, 2021.
18. Матвійчук І. О. Планування підземного простору мегаполісів у змінному геологічному середовищі. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 18 Виробництво та технології за спеціальністю 184. Гірництво. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.