

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мусієнко Данило Ігорович

УДК 519.876:624.1

ДИСЕРТАЦІЯ

Оцінювання планування підземної інфраструктури великих міст на основі
когнітивного моделювання
124 – Системний аналіз
12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Д.І. Мусієнко

Науковий керівник Савченко Ілля Олександрович, доктор технічних наук, доцент
кафедри ММСА НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Другий науковий керівник на громадських засадах: д.т.н., професор, член-
кореспондент НАН України Панкратова Н.Д.

АНОТАЦІЯ

Мусієнко Д.І. Оцінювання планування підземної інфраструктури великих міст на основі когнітивного моделювання — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 124 – Системний аналіз (12 – Інформаційні технології). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу розробки методології оцінювання планування підземної інфраструктури великих міст на основі когнітивного моделювання в умовах невизначеності. Дослідження проблеми планування підземного простору є актуальним в контексті глобальної урбанізації, оскільки концентрація населення у великих містах вимагає активного освоєння підземного простору для розміщення транспортної, комунальної та інженерної інфраструктури. Складність геологічних умов, множинність факторів ризику та наявність різних типів невизначеності ускладнюють прийняття обґрунтованих рішень щодо планування підземних споруд. Особливої актуальності набуває проблема оцінювання планування підземної інфраструктури для міста Києва, де складні інженерно-геологічні умови правобережної частини, наявність зсувонебезпечних територій та ризики воєнного характеру створюють додаткові виклики для прийняття рішень. Існуючі методи аналізу не дозволяють у повній мірі врахувати багатофакторність та взаємозалежність ризиків підземного будівництва. Необхідність системного підходу до аналізу взаємозв'язків між факторами ризику та підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності обумовлює актуальність розробки відповідної методології на основі когнітивного моделювання.

Метою дослідження є розробка методології оцінювання планування підземної інфраструктури великих міст на основі когнітивного моделювання в умовах невизначеності. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

проведено аналіз світового досвіду планування підземного простору; розроблено теоретичні основи когнітивного моделювання складних систем; запропоновано методи структурного аналізу когнітивних карт на основі симпліціального аналізу та аналізу спільнот; здійснено практичне застосування розробленої методології на прикладі м. Києва з проведенням сценарного моделювання для підтримки прийняття рішень щодо доцільності будівництва тунельних конструкцій.

Дослідження складається з чотирьох розділів, в яких послідовно проаналізовано світовий досвід планування підземного простору, розроблено теоретичні основи когнітивного моделювання складних систем, запропоновано методи структурного аналізу когнітивних карт та продемонстровано практичне застосування методології на прикладі м. Києва.

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану планування та розвитку підземної інфраструктури мегаполісів. Систематизовано світовий досвід планування підземного простору на прикладі Китаю, Німеччини, Фінляндії та Індії. Проаналізовано вплив геологічного середовища на підземне будівництво, включаючи характеристики ґрунтових масивів, гідрогеологічні умови та тектонічну активність. Досліджено природу та джерела невизначеності при плануванні підземних споруд, зокрема виділено параметричну невизначеність, структурну невизначеність та невизначеність, пов'язану з неповнотою знань про геологічне середовище. Обґрунтовано необхідність застосування когнітивного моделювання для аналізу складних систем факторів в умовах невизначеності, що зумовлена обмеженістю кількісних даних та суб'єктивністю експертних оцінок.

У другому розділі розглянуто теоретичні методологічні основи когнітивного моделювання складних систем. Обґрунтовано застосування двоетапного підходу, що включає процес передбачення та когнітивне моделювання. Наведено формальне визначення когнітивної карти як знаково-орієнтованого графа та функціонального графа, як його розширення. Визначено етапи розробки когнітивної моделі: побудова когнітивної карти, обґрунтування структурної стійкості, обґрунтування чисельної стійкості, симпліціальний аналіз та аналіз модулярності. Роз-

глянуто методи аналізу структурної стійкості на основі дослідження циклів позитивного та негативного зворотного зв'язку. Розглянуто методи аналізу чисельної стійкості когнітивної карти на основі критерію Ляпунова та зв'язок власних чисел матриці суміжності з характером динамічної поведінки системи. Описано процедуру приведення когнітивної моделі до стійкого стану шляхом коригування вагових коефіцієнтів зв'язків. Описано модель імпульсного процесу для когнітивного моделювання, яка дозволяє відстежувати розповсюдження збурень по вершинах когнітивної карти у дискретному часі. Представлено методологію сценарного аналізу, що дозволяє оцінювати реакцію системи на різні типи зовнішніх впливів шляхом задання початкових імпульсів у відповідних вершинах когнітивної карти та спостереження за динамікою зміни значень цільових концептів.

У третьому розділі розроблено методи структурного аналізу когнітивних карт на основі симпліціального аналізу та аналізу спільнот. Представлено теоретичні основи симпліціального аналізу, включаючи поняття симплексів, симпліціальних комплексів, q -зв'язності та ексцентриситету. Показано, що ці інструменти дозволяють оцінити багатовимірну структуру зв'язків у когнітивній карті та виявити ізольовані або слабо інтегровані елементи системи. Детально описано алгоритми виявлення спільнот: Greedy Modularity, Walktrap, Louvain, Leiden та Leiden CPM з аналізом їх обчислювальної складності та особливостей застосування. Обґрунтовано застосування аналізу спільнот для обґрунтування кількісних вагових характеристик когнітивної карти, виявлення функціональних підсистем та сприяння досягненню структурної стійкості моделі. Проведено порівняльний аналіз алгоритмів виявлення спільнот за критеріями модулярності та внутрішньої щільності, що дозволяє обрати найбільш адекватний метод для конкретної когнітивної карти.

У четвертому розділі проведено практичне застосування розробленої методології для оцінювання планування підземної інфраструктури м. Києва. Проаналізовано стратегічні плани розвитку підземної інфраструктури міста, зокрема генеральний план розвитку м. Києва, який передбачає будівництво мережі тунелів

для вирішення транспортних та інфраструктурних проблем. Систематизовано інженерно-геологічні та структурно-функціональні фактори, що впливають на підземне будівництво, включаючи характеристики ґрунтів, глибину залягання підземних вод, наявність карстових порожнин та техногенне навантаження від існуючої забудови. Класифіковано ризики підземного будівництва, включаючи природні, техногенні ризики та ризики воєнного характеру, що є особливо актуальним для сучасних умов України. Побудовано когнітивні карти двох тунелів: тунелю 1 (що проходить під Ботанічним садом НАН України від Наддніпровського шосе до вулиці Саперно-Слобідської) та тунелю 5 (що проходить через р. Дніпро від площі Перемоги до Броварського проспекту). Когнітивні карти включають концепти, що описують геологічні, конструктивні, екологічні та безпекові аспекти тунельних конструкцій, а також зв'язки між ними, що відображають причинно-наслідкові залежності.

Застосовано методи симпліціального аналізу для обґрунтування структурної цілісності когнітивних карт. Побудовано примальні та дуальні симпліціальні комплекси, проведено q -аналіз та обчислено структурні Q -вектори. Вперше проведено аналіз ексцентриситетів вершин когнітивної карти підземної інфраструктури. Виявлено, що вихідні когнітивні карти мають вершини з ексцентриситетом ∞ , що свідчить про структурну нецілісність та обмеження керованості системи. Вперше застосовано методи пошуку та аналізу спільнот до когнітивних карт підземної інфраструктури. Обчислено модулярність та внутрішню щільність спільнот. Метод Leiden CPM дозволив ідентифікувати вершини, видалення яких підвищує внутрішню щільність спільнот.

На основі результатів симпліціального аналізу та аналізу спільнот проведено перебудову когнітивних карт тунелів 1 і 5. Після перебудови усі вершини симпліціальних комплексів мають скінченні значення ексцентриситету, що підтверджує структурну цілісність нових когнітивних карт. Побудовано когнітивні моделі тунелів шляхом приведення когнітивних карт до структурної та чисельної стійкості.

Проведено сценарне моделювання для чотирьох типів загроз: терористична атака, реалізація техногенних загроз, зсуви порід та сейсмічні загрози. Порівняльний аналіз показав, що тунель 5 є більш стійким до всіх досліджуваних загроз, окрім терористичних, тоді як тунель 1 є більш вразливим до техногенних і природних загроз та має більший вплив на наслідки для навколишнього середовища у випадку реалізації загроз. Встановлено, що тунель 5 потребує дещо більшого часу на відновлення, що обґрунтовується довжиною та складністю локації тунелю. Результати сценарного моделювання надають інформаційну підтримку для прийняття рішень щодо доцільності побудови тунельної конструкції.

Результати дисертаційного дослідження мають наукову та практичну цінність для планування та оцінювання підземної інфраструктури великих міст. Наукова новизна полягає у тому, що вперше застосовано методи симпліціального аналізу та аналізу спільнот до когнітивних карт підземної інфраструктури, що дозволило виявити структурні недоліки когнітивних карт та обґрунтувати їх перебудову. Набуло подальшого розвитку застосування методу Leiden CPM для ідентифікації вершин когнітивної карти, що потребують додаткових зв'язків для підвищення внутрішньої щільності спільнот. Розроблена методологія забезпечує системний підхід до аналізу складних взаємозв'язків між факторами ризику при оцінюванні планування підземної інфраструктури. Запропоновані методи симпліціального аналізу та аналізу спільнот дозволяють обґрунтовувати структурну цілісність когнітивних карт та виявляти невірні дані у кількісних вагових характеристиках. Практична цінність роботи полягає у можливості застосування розробленої методології для оцінювання планування конкретних об'єктів підземної інфраструктури, порівняння альтернативних варіантів будівництва та формування рекомендацій щодо зниження ризиків. Методологія може бути адаптована для оцінювання планування інших типів складних інфраструктурних об'єктів. Результати сценарного моделювання надають інформаційну підтримку для прийняття рішень в умовах невизначеності щодо доцільності побудови тунельної конструкції та порівняльного аналізу альтернативних сценаріїв будівництва.

Ключові слова: когнітивне моделювання, підземна інфраструктура, симпліціальний аналіз, аналіз спільнот, модулярність, сценарний аналіз, невизначеність, прийняття рішень.

ABSTRACT

Musiienko D.I. Assessment of underground infrastructure planning in megacities based on cognitive modeling – Qualifying scientific work. Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree in specialty 124 – System Analysis (12 – Information Technologies). – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2026.

The dissertation solves the relevant scientific problem of developing a methodology for evaluating the planning of underground infrastructure in large cities based on cognitive modeling under uncertainty. The problem of underground space planning is relevant in the context of global urbanization, as population concentration in large cities requires active development of underground space for transportation, utility, and engineering infrastructure. The complexity of geological conditions, multiplicity of risk factors, and presence of various types of uncertainty complicate informed decision-making regarding underground structure planning. The problem of evaluating underground infrastructure planning is particularly relevant for the city of Kyiv, where complex engineering-geological conditions of the right-bank area, the presence of landslide-prone territories, and military-related risks create additional challenges for decision-making. Existing analysis methods do not fully account for the multifactorial nature and interdependence of underground construction risks. The need for a systematic approach to analyzing relationships between risk factors and supporting decision-making under uncertainty necessitates the development of an appropriate methodology based on cognitive modeling.

The aim of the research is to develop a methodology for evaluating the planning of underground infrastructure in large cities based on cognitive modeling. To achieve this aim, the following tasks were solved: analysis of international experience in underground space planning was conducted; theoretical foundations for cognitive modeling of complex systems were developed; methods for structural analysis of cognitive maps based on simplicial analysis and community detection were proposed;

practical application of the developed methodology was carried out using Kyiv as a case study, including scenario modeling for decision support regarding the feasibility of tunnel construction.

The study consists of four chapters that sequentially analyze international experience in underground space planning, develop theoretical foundations for cognitive modeling of complex systems, propose methods for structural analysis of cognitive maps, and demonstrate practical application of the methodology using Kyiv as a case study.

The first chapter presents a comprehensive analysis of the current state of planning and development of underground infrastructure in megacities. International experience in underground space planning is systematized using examples from China, Germany, Finland, and India. Common trends in underground infrastructure development are identified: integration of underground planning into urban regulatory systems, development of normative and legal frameworks, application of digital technologies, and increased attention to risk management. The influence of geological environment on underground construction is analyzed, including characteristics of soil masses, hydrogeological conditions, and tectonic activity. The nature and sources of uncertainty in underground structure planning are investigated, specifically parametric uncertainty, structural uncertainty, and uncertainty related to incomplete knowledge of the geological environment. The necessity of applying cognitive modeling for analyzing complex factor systems under uncertainty is justified, driven by the limited availability of quantitative data and the subjectivity of expert assessments.

The second chapter represents the theoretical and methodological foundations of cognitive modeling for complex systems. The application of a two-stage approach comprising the foresight process and cognitive modeling is substantiated. A formal definition of cognitive map as a signed directed graph and functional graph as its extension is provided. The stages of cognitive model development are defined: construction of cognitive map, justification of structural stability, justification of numerical stability, simplicial analysis, and modularity analysis. Methods for analyzing

structural stability based on investigation of positive and negative feedback cycles are considered. Methods for analyzing numerical stability of cognitive maps based on Lyapunov criterion and the relationship between eigenvalues of the adjacency matrix and the nature of system dynamic behavior are examined. The procedure for bringing a cognitive model to a stable state by adjusting the weight coefficients of connections is described. The impulse process model for cognitive modeling is described, which allows tracking the propagation of perturbations across cognitive map vertices in discrete time. The scenario analysis methodology is presented, enabling evaluation of system response to various types of external influences by setting initial impulses at corresponding cognitive map vertices and observing the dynamics of target concept value changes.

The third chapter develops methods for structural analysis of cognitive maps based on simplicial analysis and community detection. Theoretical foundations of simplicial analysis are presented, including concepts of simplices, simplicial complexes, q -connectivity, and eccentricity. It is shown that these tools enable the evaluation of multidimensional connection structures in cognitive maps and the identification of isolated or weakly integrated system elements. Community detection algorithms are described in detail: Greedy Modularity, Walktrap, Louvain, Leiden, and Leiden CPM, with analysis of their computational complexity and application features. The application of community analysis for justifying quantitative weight characteristics of cognitive maps, identifying functional subsystems, and facilitating structural stability of the model is substantiated. A comparative analysis of community detection algorithms based on modularity and internal density criteria is conducted, enabling the selection of the most adequate method for a specific cognitive map.

The fourth chapter presents practical application of the developed methodology for evaluating the planning of underground infrastructure in Kyiv. Strategic plans for the development of the city's underground infrastructure are analyzed, including the Kyiv General Development Plan, which envisions the construction of a tunnel network to address transportation and infrastructure challenges. Engineering-geological

and structural-functional factors affecting underground construction are systematized, including soil characteristics, groundwater depth, presence of karst cavities, and technogenic load from existing development. Risks of underground construction are classified, including natural, technogenic, and military-related risks, which are particularly relevant for the current conditions in Ukraine. Cognitive maps are constructed for two tunnels: tunnel 1 (passing under the Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine from Naddniprianske Highway to Saperno-Slobidska Street) and tunnel 5 (crossing the Dnipro River from Peremohy Square to Brovarskyi Avenue). The cognitive maps include concepts describing geological, structural, ecological, and safety aspects of tunnel constructions, as well as connections between them reflecting causal dependencies.

Simplicial analysis methods are applied to justify the structural integrity of cognitive maps. Primal and dual simplicial complexes are constructed, q -analysis is performed, and structural Q -vectors are computed. For the first time, an analysis of vertex eccentricities in cognitive maps of underground infrastructure is conducted. It is revealed that the original cognitive maps contain vertices with eccentricity ∞ , indicating structural non-integrity and limitations in system controllability. For the first time, community search and analysis methods are applied to cognitive maps of underground infrastructure. Modularity and internal density of communities are computed. The Leiden CPM method enables identification of vertices whose removal increases the internal density of communities.

Based on the results of simplicial analysis and community detection, reconstruction of cognitive maps for tunnels 1 and 5 is performed. After reconstruction, all vertices of simplicial complexes have finite eccentricity values, confirming the structural integrity of the new cognitive maps. Cognitive models of the tunnels are constructed by bringing cognitive maps to structural and numerical stability.

Scenario modeling is conducted for four threat types: terrorist attack, technogenic threats, rock displacement, and seismic threats. Comparative analysis reveals that tunnel 5 is more resilient to all investigated threats except terrorist attacks, while

tunnel 1 is more vulnerable to technogenic and natural threats and has a greater impact on environmental consequences in the event of threat realization. It is established that tunnel 5 requires somewhat longer recovery time, which is justified by the length and complexity of the tunnel location. The results of scenario modeling provide information support for decision-making regarding the feasibility of tunnel construction.

The research results have scientific and practical value for planning and evaluating underground infrastructure in large cities. The scientific novelty lies in the first-time application of simplicial analysis and community detection methods to cognitive maps of underground infrastructure, which enabled the identification of structural deficiencies in cognitive maps and justified their reconstruction. The application of the Leiden CPM method for identifying cognitive map vertices that require additional connections to increase the internal density of communities has been further developed. The developed methodology provides a systematic approach to analyzing complex relationships between risk factors in evaluating underground infrastructure planning. The proposed methods of simplicial analysis and community detection enable justification of structural integrity of cognitive maps and identification of inaccuracies in quantitative weight characteristics. The practical value of the work lies in the possibility of applying the developed methodology for evaluating the planning of specific underground infrastructure objects, comparing alternative construction options, and formulating recommendations for risk reduction. The methodology can be adapted for evaluating the planning of other types of complex infrastructure objects. The results of scenario modeling provide information support for decision-making under uncertainty regarding the feasibility of tunnel construction and comparative analysis of alternative construction scenarios.

Keywords: cognitive modeling, underground infrastructure, simplicial analysis, community detection, modularity, scenario analysis, uncertainty, decision-making.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Pankratova, N. D., Musiienko D. I. Study of the underground tunnel planning. Cognitive modelling. System research and information technologies. 2023. № 1. С. 37-50. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2023.1.03> (Scopus Q4).
Особистий внесок здобувача. Здобувачем розроблено авторський програмний комплекс, що дозволяє в процесі моделювання імпульсів та аналізу отриманих результатів вводити регулюючі або збуджуючі впливи на будь-якому етапі моделювання. Це дає змогу коригувати сценарії в динаміці побудови моделі, визначаючи ефекти, що наближають процеси до бажаних. Розроблений системний підхід застосовується для дослідження надійності проектування підземних тунелів різних типів з метою вибору обґрунтованих сценаріїв їхнього майбутнього розвитку. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування та редагування висновків.
2. Pankratova N., Pankratov V., Musiienko D. Analysis and Modelling of the Underground Tunnel Planning in Uncertainty Conditions. System Analysis and Artificial Intelligence. Studies in Computational Intelligence // Eds. Zgurovsky M., Pankratova N. Cham: Springer, 2023. Vol 1107. P 63–81, https://doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0_4 (Scopus Q4). **Особистий внесок здобувача.** Здобувачем розроблено алгоритм для побудови чисельно стійкої когнітивної карти, вершини якої містять надійні дані, отримані на етапі передбачення. Застосування когнітивного імпульсного моделювання дає змогу будувати сценарії для підземних тунелів з урахуванням різних видів невизначеностей, аналізувати вплив на них будь-яких типів загроз, відбирати найбільш надійні з них та обґрунтовувати пріоритетність їх створення. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування. **Внесок співавтора В. Панкратова:** участь в обговоренні результатів.

3. Musiienko D.I. Planning underground infrastructure in large cities under uncertainty. Питання прикладної математики та математичного моделювання. 2024. № 24. С.141–150. <https://doi.org/10.15421/322415>
4. Pankratova N. D., Musiienko D. I.. Simplicial analysis and community detection in cognitive modelling of complex systems. Питання прикладної математики та математичного моделювання. 2025. №.,25. С 195-211. <https://doi.org/10.15421/322517>. **Особистий внесок здобувача.** Здобувачем розроблено обґрунтування структурної цілісності когнітивних карт підземної інфраструктури на основі застосування методів симпліціального аналізу та аналізу срільнот. Побудовано примальні та дуальні симпліціальні комплекси та , проведено Q -аналіз та обчислено структурні Q -вектори, ексцентриситети вершин когнітивної карти. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування та редагування вступної частини.
У матеріалах конференцій:
5. Pankratova N.D., Musiienko D.I. Strategy of underground critical infrastructure planning based on cognitive modelling methodology. Міжнародна наукова конференція «Наукові тренди постіндустріального суспільства». Матеріали IV Міжнародної наукової конференції «Наукові тренди постіндустріального суспільства». (м. Суми 31 бер. 2023). Вінниця: Європейська наукова платформа. 2023. С. 141-145. <https://doi.org/10.36074/mcnd-31.03.2023> URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/31.03.2023/21>. **Особистий внесок здобувача.** Здобувачем розроблено програмний комплекс, який дозволяє в процесі когнітивного моделювання вводити регулюючі або збуджуючі впливи на вершини когнітивної карти. Це дає змогу створювати сценарії в ході побудови моделі, визначаючи ефекти, що наближають процеси до бажаних. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування.
6. Musiienko D. Cognitive modeling of energy infrastructure performance assessment. Mathematical support and software for intelligent systems (MSSIS-

2023): Abstracts of the XXI International scientific and practical conference, Dnipro, November 22-24, 2023 / Under the general editorship of E.M. Kiseleva. – Dnipro: DNU, 2023. – 328 p.

7. Панкратова Н.Д., Панкратов В.А., Мусієнко Д.І., Синергія структур когнітивних моделей складних систем при динамічних навантаженнях. Перша всеукраїнська наукова конференція «Когнітивні дослідження: результати, виклики та перспективи» перспективи (CR-2024). Матеріали доповідей 1-ї Всеукраїнської наукової конференції «Когнітивні дослідження: результати, виклики та перспективи – 2024». (Київ. 24 травня 2024 р.), Київ: Видавництво «Каравела», 2024. С. 23-28 URL: <https://drive.google.com/file/d/1bjioYxbdjkejCoLaH2G9DwflXp5PmlDw/view>.
Особистий внесок здобувача. Здобувачем розроблено дослідження когнітивної моделі складної системи, що проводиться на підставі різної теоретичної і практичної інформації, експертних та статистичних даних.
Внесок співавтора Н. Панкратової: здійснено наукове консультування.
Внесок співавтора В. Панкратова: участь в обговоренні результатів.
8. Pankratova N.D., Musiienko D.I., Community analysis and modularity assessment in cognitive modelling of complex systems, Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС-2025): Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції. (Дніпро, 19-21, листоп. 2025). Дніпро: ДНУ, 2025. Р. 33-34. URL: <http://mpzis.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2025/11/%D0%9C%D0%9F%D0%97%D0%86%D0%A1-2025.pdf>.
Особистий внесок здобувача. Здобувачем отримане значення модулярності $Q = 0,58510$, що свідчить про наявність чіткої структури спільнот та дозволяє припустити, що систему тунелів дійсно можна розглядати як сукупність окремих, але взаємопов'язаних функціональних модулів.
Внесок співавтора Н. Панкратової: здійснено наукове консультування та редагування висновків.

ЗМІСТ

ВСТУП	21
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПЛАНУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ ПІД- ЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕГАПОЛІСІВ	27
1.1 Глобальні тенденції урбанізації та роль підземного простору міст	27
1.2 Планування підземного простору: світовий досвід та нормативне регулювання	30
1.3 Геологічне середовище та його вплив на підземне будівництво	34
1.4 Ризики та небезпечні явища при будівництві тунелів	37
1.5 Техніко-економічні аспекти та сучасні технології планування	43
1.6 Аналіз існуючих підходів та постановка наукової задачі	48
1.7 Висновки до розділу 1	51
2 ПОБУДОВА КОГНІТИВНОЇ МОДЕЛІ СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ. ОБ- ГРУНТУВАННЯ ЧИСЕЛЬНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СТІЙКОСТІ	54
2.1 Методологія отримання вихідних даних для когнітивного моделю- вання	55
2.1.1 Методи якісного аналізу в процесі передбачення	56
2.1.2 Формування інтегрованого показника даних	58
2.2 Побудова когнітивної карти складної системи	59
2.2.1 Формальне визначення когнітивної карти	59
2.2.2 Функціональний граф як розширення когнітивної карти	60
2.2.3 Процедура побудови когнітивної карти	60
2.2.4 Ієрархічна когнітивна карта	61
2.3 Етапи розробки когнітивної моделі складної системи	62
2.4 Аналіз структурної стійкості когнітивної карти	63
2.4.1 Класифікація циклів когнітивної карти	64
2.4.2 Критерій структурної стійкості	64

2.4.3	Алгоритм визначення циклів	65
2.4.4	Алгоритм перевірки структурної стійкості	66
2.5	Чисельна стійкість когнітивної моделі	66
2.5.1	Критерій стійкості за Ляпуновим	66
2.5.2	Власні числа матриці суміжності	67
2.5.3	Класифікація типів динамічної поведінки	67
2.5.4	Зв'язок структурної та чисельної стійкості	68
2.6	Процедура приведення когнітивної моделі до стійкого стану	68
2.6.1	Класичні підходи до приведення моделі до стійкості	69
2.6.2	Оптимізаційний алгоритм приведення до чисельної стійкості	70
2.6.3	Процедура розв'язання оптимізаційної задачі	72
2.6.4	Порівняльний аналіз підходів	72
2.7	Імпульсне когнітивне моделювання та сценарний аналіз	73
2.7.1	Модель імпульсного процесу	74
2.7.2	Сценарний аналіз	74
2.7.3	Аналіз результатів моделювання	75
2.7.4	Приклад імпульсного моделювання	75
2.7.5	Стаціонарний стан та збіжність	76
2.8	Висновки до розділу 2	77
3	СИМПЛІЦІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА АНАЛІЗ СПІЛЬНОТ КОГНІТИВ- НИХ МОДЕЛЕЙ	79
3.1	Теоретичні основи симпліціального аналізу	80
3.1.1	Історія розвитку методу	80
3.1.2	Базові поняття та визначення	81
3.1.3	Побудова симпліціальних комплексів для когнітивних карт	82
3.1.4	Характеристики q-зв'язності	83
3.1.5	Ексцентриситет як характеристика інтегрованості	83
3.1.6	Процедура симпліціального аналізу когнітивних карт	84

3.2	Теоретичні основи аналізу спільнот	85
3.2.1	Визначення спільноти та характеристики щільності	85
3.2.2	Модулярність як міра якості розбиття	86
3.3	Алгоритми виявлення спільнот	86
3.3.1	Алгоритм Greedy Modularity	87
3.3.2	Алгоритм Walktrap	87
3.3.3	Алгоритм Louvain	88
3.3.4	Алгоритм Leiden	89
3.3.5	Алгоритм Leiden CPM	90
3.3.6	Порівняння алгоритмів	90
3.4	Застосування аналізу спільнот у когнітивному моделюванні	91
3.4.1	Обґрунтування вагових характеристик	91
3.4.2	Виявлення функціональних підсистем	92
3.5	Висновки до розділу 3	92
4	ОЦІНЮВАННЯ ПЛАНУВАННЯ ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. КИЄВА	94
4.1	Генеральний план м. Києва та підземне будівництво	94
4.2	Фактори впливу на планування підземного будівництва	95
4.2.1	Інженерно-геологічні фактори	96
4.2.2	Структурно-функціональні характеристики території	96
4.3	Класифікація ризиків підземного будівництва	97
4.3.1	Ризики, що мінімізуються будівництвом тунелів	97
4.3.2	Ризики воєнного характеру	97
4.4	Побудова когнітивної карти підземних об'єктів м. Києва	98
4.5	Побудова когнітивної моделі підземних об'єктів м. Києва	101
4.6	Обґрунтування чисельної стійкості	102
4.6.1	Обґрунтування чисельної стійкості тунеля 1	102
4.6.2	Обґрунтування чисельної стійкості тунеля 5	103

4.7	Обґрунтування структурної стійкості	105
4.7.1	Обґрунтування структурної стійкості тунеля 1	105
4.7.2	Обґрунтування структурної стійкості тунеля 5	105
4.8	Обґрунтування структурної цілісності за допомогою симпліціального аналізу	106
4.8.1	Обґрунтування структурної цілісності тунеля 1	107
4.8.2	Обґрунтування структурної цілісності тунеля 5	112
4.9	Пошук та аналіз спільнот і модулярності	129
4.9.1	Пошук та аналіз спільнот і модулярності тунеля 1	130
4.9.2	Пошук та аналіз спільнот і модулярності тунеля 5	133
4.10	Перебудова когнітивної карти тунелів 1 і 5 з врахуванням результатів симпліціального аналізу та аналізу спільнот	137
4.11	Обґрунтування структурної цілісності перебудованих когнітивних карт	139
4.11.1	Обґрунтування структурної цілісності нової когнітивної карти тунеля 1	139
4.11.2	Обґрунтування структурної цілісності нової когнітивної карти тунеля 5	151
4.12	Пошук та аналіз спільнот і модулярності нових когнітивних карт тунелів 1 і 5	164
4.12.1	Пошук та аналіз спільнот і модулярності нової когнітивної карти тунелю 1	165
4.12.2	Пошук та аналіз спільнот і модулярності нової когнітивної карти тунелю 5	168
4.13	Обґрунтування структурної і чисельної стійкості нових когнітивних карт тунелів 1 і 5	171
4.14	Імпульсне когнітивне моделювання	173
4.14.1	Порівняння результатів моделювання до і після побудови когнітивної моделі	173

4.15	Результати імпульсного когнітивного моделювання для побудова-	
	них когнітивних моделей тунелів 1 і 5	176
4.15.1	Сценарій №1: загрози терористичного характеру	176
4.15.2	Сценарій №2: загрози техногенного характеру	178
4.15.3	Сценарій №3: загрози зсувів порід	180
4.15.4	Сценарій №4: загрози сейсмічного характеру	182
4.16	Висновки до розділу 4	184
ВИСНОВКИ		187
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		191
ДОДАТОК 1		203

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку людської цивілізації характеризується безпрецедентними темпами урбанізації. За даними Організації Об'єднаних Націй, станом на 2018 рік понад 55% населення світу проживало в міських районах, а до 2050 року цей показник, за прогнозами, досягне 68%. Така концентрація населення створює колосальний тиск на міську інфраструктуру, транспортні системи та здійснює вагомий вплив на екологічне середовище.

Традиційний підхід до розвитку міст, орієнтований переважно на освоєння наземного простору, вичерпує свій потенціал у більшості великих міст світу. Історичні центри європейських міст, щільна забудова мегаполісів, обмеженість територій — усе це змушує забудовників та інженерів шукати альтернативні рішення. У цьому контексті підземний простір міст набуває стратегічного значення як резерв для розміщення транспортної, інженерної та комунальної інфраструктури.

Концепція підземного урбанізму передбачає системний підхід до освоєння підземного простору як невід'ємної складової міського середовища. На відміну від традиційного погляду на підземні споруди як ізольовані інженерні об'єкти, сучасна парадигма розглядає підземний простір як багатофункціональний ресурс, що потребує комплексного планування та управління. Роль підземного простору в забезпеченні сталого розвитку міст визначається кількома ключовими факторами: захист від несприятливих кліматичних умов та природних катаклізмів, звільнення наземного простору для рекреаційних зон та озеленення, забезпечення ефективної мобільності в умовах щільної міської забудови.

Для України питання розвитку підземної інфраструктури набуло особливої актуальності в умовах повномасштабної війни, що розпочалася у 2022 році. Підземні споруди виконують критично важливу функцію захисту цивільного населення від ракетних обстрілів та авіаударів. Станції метрополітену, підземні

переходи та паркінги використовуються як укриття для тисяч людей під час повітряних тривог. Цей досвід демонструє, що підземна інфраструктура є не лише елементом транспортної системи чи комунального господарства, але й критично важливим компонентом цивільної безпеки та стійкості міст в умовах воєнних загроз. Планування нових підземних споруд в Україні має враховувати цю подвійну функцію — як елементів міської інфраструктури, так і потенційних захисних споруд.

Складність геологічних умов, множинність факторів ризику та наявність різних типів невизначеності ускладнюють прийняття обґрунтованих рішень щодо планування підземних споруд. Традиційні методи аналізу ризиків мають обмежену ефективність у контексті підземного будівництва через високу залежність від геологічних, техногенних та соціальних факторів. Це обґрунтовує необхідність застосування нових підходів, зокрема когнітивного моделювання, що дозволяє системно аналізувати взаємозв'язки між факторами в умовах невизначеності.

Когнітивні карти як інструмент моделювання складних систем дозволяють поєднувати технічні, економічні, екологічні та соціальні чинники, аналізувати властивості систем, зокрема стійкість, прогнозувати розвиток та обґрунтовувати управлінські рішення. Застосування методів симпліціального аналізу та аналізу спільнот до когнітивних карт відкриває нові можливості для обґрунтування структурної цілісності моделей та виявлення функціональних підсистем.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка методології оцінювання планування підземної інфраструктури великих міст на основі когнітивного моделювання в умовах невизначеності.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язання наступних задач:

1. провести аналіз сучасного стану планування підземної інфраструктури мегаполісів та систематизувати світовий досвід;
2. дослідити природу та джерела невизначеності при плануванні підземних споруд;

3. розробити теоретичні основи когнітивного моделювання систем планування підземної інфраструктури;
4. розробити методи аналізу структурної та чисельної стійкості когнітивних карт;
5. розробити методи структурного аналізу когнітивних карт на основі симпліціального аналізу;
6. обґрунтувати застосування методів аналізу спільнот для структурного аналізу когнітивних карт;
7. побудувати когнітивні моделі для оцінювання планування підземної інфраструктури м. Києва;
8. провести сценарне моделювання для оцінювання стійкості підземних споруд до різних типів загроз.

Об'єктом дослідження є процеси планування підземної інфраструктури великих міст в умовах невизначеності.

Предметом дослідження є методи та моделі когнітивного моделювання для оцінювання планування підземної інфраструктури великих міст.

Методи дослідження. У дослідженні використовувались методи системного аналізу, когнітивного моделювання, теорії графів, алгебраїчної топології, зокрема:

1. теоретичні (формалізація, математичні доведення, побудова моделей);
2. емпіричні (обчислювальні експерименти, сценарне моделювання, опис результатів);
3. загальнологічні (порівняння, аналіз, синтез);
4. методи симпліціального аналізу (q -аналіз, обчислення ексцентриситетів);
5. методи аналізу спільнот (алгоритми Louvain, Leiden, Greedy Modularity, Walktrap, Leiden CPM).

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі отримано наступні результати.

Вперше:

- застосовано методи симпліціального аналізу для обґрунтування структурної цілісності когнітивних карт підземної інфраструктури, що дозволяє виявляти ізольовані та слабо інтегровані елементи системи;
- проведено аналіз ексцентриситетів вершин когнітивної карти підземної інфраструктури як критерію структурної цілісності та керованості системи;
- застосовано методи пошуку та аналізу спільнот (Louvain, Leiden, Greedy Modularity, Walktrap, Leiden CPM) до когнітивних карт підземної інфраструктури для обґрунтування кількісних вагових характеристик та виявлення функціональних підсистем;
- побудовано достовірно обґрунтовану модель когнітивної карти на основі залучення результатів симпліціального аналізу та аналізу спільнот для досягнення структурної цілісності моделі.

Набули подальшого розвитку:

- методологія когнітивного моделювання складних систем шляхом інтеграції етапів симпліціального аналізу та аналізу модулярності в процес розробки когнітивної моделі;
- методи аналізу стійкості когнітивних карт на основі критерію Ляпунова та дослідження власних чисел матриці суміжності;
- застосування інструментарію імпульсного когнітивного моделювання до задач планування міської підземної інфраструктури в умовах багатофакторної невизначеності.

Практичне значення одержаних результатів. В результаті дослідження отримано модифіковану методологію когнітивного моделювання, що має значну практичну цінність для планування та оцінювання підземної інфраструктури великих міст.

Розроблена методологія дозволяє системно аналізувати взаємозв'язки між факторами ризику при плануванні підземних споруд, що може бути використано для обґрунтування проектних рішень та порівняльного аналізу альтернативних варіантів будівництва.

Залучені методи симпліціального аналізу та аналізу спільнот забезпечують обґрунтування структурної цілісності когнітивних карт та виявлення некоректностей у кількісних вагових характеристиках, що підвищує достовірність результатів моделювання.

Результати імпульсного когнітивного моделювання надають інформаційну підтримку для прийняття рішень щодо вибору оптимальних варіантів будівництва підземних споруд з урахуванням різних типів загроз.

Запропоновані методи можуть бути застосовані при стратегічному плануванні міського підземного простору, оцінюванні ризиків підземного будівництва, проектуванні транспортних тунелів та інших підземних споруд.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, що виносяться на захист, отримано здобувачем особисто. Зокрема, у роботах, написаних у співавторстві, здобувачем проведено аналіз існуючих методів, розроблено когнітивні карти планування підземної інфраструктури м. Києва, розроблено алгоритм приведення когнітивних карт до чисельної стійкості, проведено симпліціальний аналіз когнітивних карт, проведено аналіз ексцентриситетів вершин когнітивної карти підземної інфраструктури як критерію структурної цілісності та керованості системи, застосовано методи аналізу спільнот для обґрунтування структурної цілісності моделей, розроблено методологію перебудови когнітивних карт на основі результатів симпліціального аналізу та аналізу спільнот для досягнення структурної цілісності моделі, розроблено когнітивні моделі планування підземної інфраструктури м. Києва, виконано сценарне моделювання для різних типів загроз, здійснено порівняльний аналіз стійкості альтернативних варіантів тунелів та інтерпретацію отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати та основні положення дисертаційної роботи були апробовані та представлені на 4 наукових конференціях, в межах яких було опубліковано тези:

- Pankratova N.D., Musiienko D.I. Strategy of underground critical infrastructure planning based on cognitive modelling methodology. Наукові тренди постін-

дустріального суспільства: матеріали спеціалізованої наукової конференції. (м. Суми, 31 бер. 2023 р.). Вінниця, 2023. С. 141-145

- Musiienko D. Cognitive modeling of energy infrastructure performance assessment. Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС-2023): тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф., (Дніпро, 22-24 лист. 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 29-30.
- Панкратова Н.Д., Панкратов В.А., Мусієнко Д.І., Синергія структур когнітивних моделей складних систем при динамічних навантаженнях. Когнітивні дослідження: результати, виклики та перспективи: матеріали наук. конф. (Київ, 24 травня 2024 р.). Київ, 2024. С. 23-27
- Pankratova N.D., Musiienko D.I, community analysis and modularity assessment in cognitive modelling of complex systems, тези доповідей XXIII міжнар. наук.-практ. конф., Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС- 2025) (Дніпро, 19-21 лист. 2025 р.). Дніпро, 2025. С. 33-34.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано у **8** наукових працях, з них **4** – у вітчизняних фахових виданнях і зарубіжних виданнях, зокрема 2 статті, що індексуються у наукометричній базі Scopus; 2 статті у фаховому виданні категорії Б, 4 тезах у матеріалах доповідей міжнародних і національних конференцій.

Структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на **202** сторінках і містить **173** сторінки основної частини, **38** рисунків, **39** таблиць, список використаних джерел із **91** найменувань та **1** додатку.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПЛАНУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕГАПОЛІСІВ

1.1 Глобальні тенденції урбанізації та роль підземного простору міст

Сучасний етап розвитку людської цивілізації характеризується безпрецедентними темпами урбанізації. За даними Організації Об'єднаних Націй [1], станом на 2018 рік понад 55% населення світу проживало в міських районах, а до 2050 року цей показник, за прогнозами, досягне 68%. Особливо інтенсивно процеси урбанізації відбуваються в країнах Азії та Африки, де формуються нові мегаполіси з населенням понад 10 мільйонів осіб. Така концентрація населення, особливо у військовий час, створює колосальний тиск на міське населення, інфраструктуру, транспортні системи та здійснює вагомий вплив на екологічне середовище.

Традиційний підхід до розвитку міст, орієнтований переважно на освоєння наземного простору, вичерпує свій потенціал у більшості великих міст світу. Історичні центри європейських міст, щільна забудова мегаполісів в країнах східної Азії, обмеженість територій острівних держав — усе це змушує забудовників та інженерів шукати альтернативні рішення. У цьому контексті підземний простір міст набуває стратегічного значення як резерв для розміщення населення, транспортної, інженерної та комунальної інфраструктури [2].

Концепція підземного урбанізму, що активно розвивається з кінця ХХ століття, передбачає системний підхід до освоєння підземного простору як невід'ємної складової міського середовища [3]. На відміну від традиційного погляду на підземні споруди як ізольовані інженерні об'єкти, сучасна парадигма розглядає підземний простір як багатофункціональний ресурс, що потребує комплексного планування та управління. У дослідженні [4] обґрунтовано необхідність інтеграції підземного планування в загальну стратегію сталого розвитку міст, визначено ключові принципи та критерії ефективного використання підземного простору.

Роль підземного простору в забезпеченні сталого розвитку міст визначається кількома ключовими факторами. По-перше, підземні споруди забезпечують захист від несприятливих кліматичних умов та природних катаклізмів, що особливо актуально в умовах глобальних кліматичних змін. По-друге, розміщення інфраструктури під землею дозволяє звільнити наземний простір для рекреаційних зон, озеленення та покращення якості міського середовища. По-третє, підземні транспортні системи є найбільш ефективним рішенням для забезпечення мобільності в умовах щільної міської забудови [5].

В роботі [5] продемонстровано методологію інтеграції підземного простору в генеральні плани міст на прикладі фінських міст. Обґрунтовано необхідність розробки спеціальних регуляторних механізмів та планувальних інструментів для ефективного управління підземними ресурсами. Особливу увагу приділено питанням власності на підземний простір, координації між різними користувачами та забезпеченню доступу для майбутнього розвитку.

Трансформація підходів до використання підземного простору особливо помітна в азійських мегаполісах. У публікації [6] проведено комплексний аналіз стану та тенденцій розвитку підземного простору в китайських містах. Дослідження охоплює понад 30 великих міст Китаю та демонструє вражаючі масштаби підземного будівництва: загальна площа підземних споруд у деяких містах перевищує 100 мільйонів квадратних метрів. Виділено декілька етапів розвитку підземної інфраструктури — від будівництва окремих об'єктів до формування інтегрованих підземних мереж.

Німецький досвід планування підземного простору заслуговує на особливу увагу з огляду на розвинену нормативно-правову базу та системний підхід до управління підземними ресурсами. Згідно з [7], існує необхідність інтеграції тривимірного підходу в традиційне двовимірне планування території та розробки нових інструментів для візуалізації та аналізу підземного простору.

Фінляндія є однією з країн-лідерів у сфері системного освоєння підземного простору. Дослідження [8] описує унікальний досвід Гельсінкі, де підземний

генеральний план було інтегровано в загальну систему міського планування ще в 1990-х роках. Особливістю фінського підходу є обов'язкове резервування підземного простору для майбутніх потреб та координація між різними секторами міського господарства.

Питання безпеки підземних споруд є критично важливим аспектом їх проектування та експлуатації. На прикладі великого підземного комплексу в Мінеаполісі [9] продемонстровано підходи до забезпечення життєвої безпеки у великих гірничопрохідницьких спорудах. Дослідження охоплює питання евакуації, пожежної безпеки, вентиляції та інших аспектів, що є критичними для безпечної експлуатації підземних об'єктів.

Важливим напрямком сучасних досліджень є концепція сталого підземного урбанізму (Sustainable Underground Urbanism). У [3] запропоновано новий теоретичний фреймворк, в якому переосмислюється роль підземного простору в контексті принципів сталого розвитку. Наголошено на необхідності переходу від технократичного підходу до більш холістичного розуміння підземного простору як частини складної соціо-технічної системи міста.

У дослідженні [10] підземний простір розглянуто як джерело множинних ресурсів, включаючи не лише простір для розміщення інфраструктури, але й геотермальну енергію, підземні води та потенціал для зберігання різних матеріалів. Такий мультиресурсний підхід вимагає координації між різними галузями та розробки інтегрованих стратегій управління підземними ресурсами.

Український контекст розвитку підземної інфраструктури має свою специфіку, пов'язану з особливостями історичного розвитку міст, геологічними умовами та економічними факторами. У роботі [11] розроблено системний підхід до планування розвитку міського підземного простору, що враховує специфіку українських умов. Запропоновано методологію, що інтегрує елементи передбачення та когнітивного моделювання для обґрунтування стратегічних рішень у сфері підземного будівництва.

Окремої уваги заслуговує проблема геоекологічних ризиків при освоєнні підземного простору історичних міст. У дослідженні [12] проаналізовано специфічні ризики розвитку підземного простору в центральній частині Львова, де наявність карстових порожнин, історичних підвалів та складна гідрогеологічна обстановка створюють особливі виклики для підземного будівництва.

Таким чином, аналіз глобальних тенденцій урбанізації свідчить про зростаючу роль підземного простору в забезпеченні сталого розвитку міст. Провідні країни світу активно розробляють та впроваджують комплексні стратегії освоєння підземного простору, що інтегрують технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Для України актуальним є вивчення та адаптація кращих світових практик з урахуванням національної специфіки.

1.2 Планування підземного простору: світовий досвід та нормативне регулювання

Ефективне освоєння підземного простору міст вимагає розробки комплексної системи планування, що охоплює стратегічний, тактичний та оперативний рівні прийняття рішень. Світовий досвід демонструє різноманітність підходів до організації підземного планування, що відображає специфіку національних правових систем, традицій містобудування та економічних умов [4]. Аналіз кращих практик різних країн дозволяє виявити ключові принципи та механізми, що забезпечують ефективне управління підземними ресурсами.

Китайська Народна Республіка демонструє найбільш динамічний розвиток підземної інфраструктури у світі. За останні три десятиліття в китайських містах побудовано понад 200 ліній метрополітену загальною протяжністю більше 9000 кілометрів. Систематизація досвіду міст Китаю [6] дозволила виділити кілька ключових етапів еволюції підходів. На початковому етапі підземне будівництво розглядалося переважно як вирішення транспортних проблем. Поступово формувалося розуміння необхідності комплексного підходу, що охоплює різні функції

підземного простору — транспорт, комунальну інфраструктуру, комерційні та громадські об'єкти.

Особливістю китайського підходу є активна роль держави у плануванні та фінансуванні підземного будівництва. Більшість великих міст Китаю розробили спеціальні генеральні плани розвитку підземного простору, що визначають пріоритетні зони освоєння, функціональне зонування та етапність реалізації. Важливим елементом є координація підземного планування з генеральними планами розвитку міст та регіональними стратегіями [6].

Німецький досвід планування підземного простору характеризується високим рівнем правової регламентації та системним підходом до координації різних секторів. Аналіз [7] свідчить, що традиційне німецьке просторове планування орієнтоване переважно на двовимірний підхід, що створює певні обмеження для ефективного управління підземними ресурсами.

Важливим аспектом німецького підходу є чітка система правил щодо власності на підземний простір та регулювання відносин між різними користувачами. Законодавство визначає права та обов'язки власників земельних ділянок щодо підземного простору, механізми компенсації за обмеження у використанні та процедури погодження підземних проектів. Особлива увага приділяється захисту підземних вод та геологічного середовища від негативного впливу будівництва.

Фінський досвід є унікальним прикладом системного підходу до освоєння підземного простору на національному рівні. Згідно з [8], ключовим елементом є обов'язкове резервування підземного простору для майбутніх потреб, що забезпечує збереження можливостей для розвитку наступних поколінь.

Гельсінкі став першим містом у світі, що системно розробило комплексний підземний генеральний план (Underground Master Plan). Цей документ визначає зони, придатні для різних типів підземного використання, враховуючи геологічні умови, наявну інфраструктуру та перспективи розвитку. Важливою особливістю є публічний характер плану, що дозволяє всім зацікавленим сторонам враховувати його положення при плануванні своєї діяльності.

Індійський досвід розвитку підземної інфраструктури демонструє виклики, пов'язані з швидкою урбанізацією в умовах обмежених ресурсів. Аналіз стану тунелебудівної галузі в Індії [13] свідчить про значне зростання обсягів підземного будівництва, пов'язане переважно з реалізацією проектів метрополітену в найбільших містах країни. Водночас існують суттєві проблеми з технологічним забезпеченням, підготовкою кадрів та управлінням ризиками.

Вплив будівництва метрополітену на міське середовище досліджено в [14] на прикладі індійських міст. Проаналізовано вплив будівельних робіт на транспортне середовище та розроблено рекомендації щодо мінімізації негативних наслідків для міської мобільності в період будівництва. Це питання є особливо актуальним для густонаселених міст, де будь-які обмеження руху створюють значні незручності для населення.

Міжнародна асоціація тунелів та підземного простору (ITA-AITES) відіграє ключову роль у розробці міжнародних стандартів та рекомендацій у сфері підземного будівництва. Офіційні рекомендації ITA щодо управління ризиками при тунелюванні [15] визначають загальні принципи ідентифікації, оцінки та управління ризиками на всіх етапах життєвого циклу тунельних проектів — від концептуального планування до експлуатації та виведення з експлуатації.

Оновлена редакція Кодексу практики з управління ризиками тунельних робіт [16] була опублікована у 2023 році спільно ITA-AITES та Міжнародною асоціацією експертів в страхуванні від інженерних ризиків (IMIA). Третя редакція документа враховує досвід, накопичений за майже два десятиліття застосування попередніх версій, та відображає сучасні підходи до управління ризиками в тунелебудуванні. Особливу увагу приділено питанням геотехнічних ризиків, координації між учасниками проекту та розподілу відповідальності.

Питання прийняття рішень в умовах невизначеності є центральним для планування підземних проектів. У [17] розроблено методологію аналізу рішень для підземної інфраструктури з використанням невизначених даних та нечітких шкал. Запропоновано формалізований підхід до порівняння альтернативних ва-

ріантів підземних проектів в умовах, коли вхідні дані характеризуються значною невизначеністю.

Сучасні тенденції в плануванні підземного простору характеризуються все ширшим застосуванням цифрових технологій. Інформаційне моделювання будівель (BIM) стає стандартним інструментом для проектування та управління підземними об'єктами. У [18] розроблено підхід до інтеграції геопросторових даних та просторового аналізу трас тунелів, що забезпечує підтримку прийняття рішень на різних етапах проекту.

У дослідженні [19] розглянуто застосування BIM для оптимізованої експлуатації автодорожніх тунелів. Розроблено підхід до моделювання, визначено інформаційні вимоги та продемонстровано приклад практичної реалізації. Особливу увагу приділено питанням інтеграції даних з різних систем моніторингу та підтримки прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Український досвід планування підземного простору знаходиться на етапі формування. У роботі [11] запропоновано системний підхід до планування розвитку міського підземного простору, що враховує специфіку українських умов. Методологія ґрунтується на інтеграції методів передбачення та когнітивного моделювання, що дозволяє враховувати довгострокові тенденції та взаємозв'язки між різними факторами розвитку.

Подальший розвиток методології когнітивного моделювання для планування підземного будівництва представлено в роботі [20]. Обґрунтовано застосування когнітивних карт для аналізу складних систем факторів, що впливають на успішність проектів підземної забудови. Особливу увагу приділено питанням урахування невизначеності та динаміки системи в процесі прийняття стратегічних рішень.

Таким чином, аналіз світового досвіду демонструє різноманітність підходів до планування підземного простору, що відображає специфіку національних умов. Спільними тенденціями є: інтеграція підземного планування в загальну систему містобудівного регулювання; розвиток нормативно-правової бази для

управління підземними ресурсами; застосування цифрових технологій для підтримки прийняття рішень; посилення уваги до управління ризиками та забезпечення безпеки. Для України актуальним є формування власної системи підземного планування з урахуванням кращих світових практик.

1.3 Геологічне середовище та його вплив на підземне будівництво

Геологічне середовище є визначальним фактором, що впливає на всі аспекти підземного будівництва — від вибору місця та методу проходки до вартості та термінів реалізації проекту. Розуміння геологічних умов та їх впливу на інженерні рішення є фундаментом успішного планування підземних споруд. Історія розвитку геотехніки як науки нерозривно пов'язана з вирішенням практичних проблем тунелебудування, і багато класичних концепцій було сформульовано саме на основі досвіду підземного будівництва [21].

У роботі [21] систематизовано знання про дефекти гірських порід та їх вплив на навантаження на тунельне кріплення. Запропоновано класифікацію гірських порід за їх особливостями при проходці тунелів та розроблено методи розрахунку тиску на кріплення для різних геологічних умов. Ці концепції залишаються актуальними і сьогодні, хоча й отримали значний розвиток у подальших дослідженнях.

У [22] узагальнено десятиліття досвіду застосування механіки ґрунтів в інженерній практиці. Ця робота охоплює широкий спектр питань — від фізичних властивостей ґрунтів до практичних методів проектування фундаментів, підпірних стін та підземних споруд. Особливу цінність представляють численні приклади з реальної інженерної практики та аналіз причин аварій і відмов.

Значний внесок у розвиток методів проектування глибоких котлованів та тунелів у м'яких ґрунтах було зроблено в доповіді на 7-й Міжнародній конференції з механіки ґрунтів та фундаментобудування [23], яка стала класичною роботою в галузі підземного будівництва. Систематизовано досвід будівництва глибоких

котлованів та тунелів у різних геологічних умовах та запропоновано практичні методи прогнозування деформацій поверхні.

Класифікація гірських порід є ключовим інструментом для оцінки умов тунелювання та вибору методів проходки і кріплення. Найбільш широко використовуються дві класифікаційні системи: Rock Mass Rating (RMR), розроблена у роботі [24], та Q-system, запропонована в роботі [25]. Обидві системи ґрунтуються на кількісній оцінці ключових параметрів гірського масиву — міцності порід, ризиків виникнення тріщин, обводнення та інших факторів.

Система RMR, вперше представлена у 1973 році та вдосконалена у подальших роботах, використовує шість параметрів для оцінки якості гірського масиву: міцність неушкодженої породи, показник якості породи RQD, відстань між тріщинами в гірському масиві, стан тріщин, гідрогеологічні умови та орієнтація тріщин відносно виробки. На основі сумарного рейтингу визначається клас гірського масиву та рекомендуються параметри кріплення [24].

Показник якості породи RQD (Rock Quality Designation), запропонований в роботі [26] у 1964 році, є одним з базових параметрів для обох класифікаційних систем. RQD — це відношення сумарної довжини відрізків керну довжиною ≥ 10 см до загальної довжини пробуреного інтервалу, виражене у відсотках. Незважаючи на простоту визначення, цей показник залишається важливим індикатором якості гірського масиву.

Q-система [25] була розроблена на основі аналізу понад 200 тунелів у Скандинавії та використовує шість параметрів, об'єднаних у три співвідношення: розмір блоків породи (RQD/J_n), міцність між блоками (J_r/J_a) та активний тиск (J_w/SRF). Результуюче значення Q може варіюватися в широкому діапазоні — від 0,001 для надзвичайно поганих умов до 1000 для виключно сприятливих. Система дозволяє визначати необхідний тип та обсяг кріплення для конкретних умов.

У дослідженні [27] розроблено критерій міцності для гірських порід, що мають тріщини та запропоновано Geological Strength Index (GSI) як інструмент для оцінки міцнісних характеристик масиву. GSI базується на візуальній оцінці

структури масиву та стану поверхонь тріщин і дозволяє оцінювати параметри критерію міцності Hoek-Brown для масиву в цілому. Цей підхід широко використовується для чисельного моделювання поведінки гірського масиву навколо підземних виробок.

Сучасний аналіз застосування класифікаційних систем виявляє як їх переваги, так і обмеження. У [28] проаналізовано еволюцію та практичне застосування систем RMR і Q. Відзначено, що обидві системи були розроблені переважно на основі досвіду тунелювання у скельних породах Скандинавії та можуть потребувати адаптації для інших геологічних умов.

У [29] звернено увагу на проблеми неправильного застосування класифікаційних систем у інженерній практиці. Наголошено, що класифікаційні системи є корисним інструментом попередньої оцінки, але не можуть замінити детальних інженерно-геологічних досліджень та чисельного моделювання для відповідальних проектів. Часто спостерігається необґрунтоване екстраполювання рекомендацій класифікаційних систем за межі умов, для яких вони були розроблені.

У [30] проаналізовано взаємозв'язок між RMR та Q-системою для тектонічно порушених порід. Виявлено, що традиційні кореляційні залежності між цими системами можуть бути неточними для зон розломів та слабких порід.

Прогнозування геологічних умов перед пробуренням є критично важливим для безпечного та ефективного тунелювання. У [31] систематизовано різні методи попередньої геологічної розвідки при будівництві тунелів — сейсмічні, електричні, електромагнітні та комбіновані — та проаналізовано їх переваги і обмеження для різних геологічних умов.

Особливі труднощі виникають при тунелюванні в несприятливих геологічних умовах. У дослідженні [32] проаналізовано виклики, пов'язані з роботою тунелепрохідницьких комплексів (ТВМ) у складних геологічних умовах — зонах розломів, м'яких ґрунтах з валунами, районах з високими напорами підземних вод та інших проблемних ситуаціях. Систематизовано типові проблеми та розроблено рекомендації щодо їх попередження та подолання.

Осідання земної поверхні є одним з основних геотехнічних ризиків при тунелюванні в міських умовах. Закономірності переміщень ґрунту при міському тунелюванні та їх вплив на існуючі будівлі проаналізовано у [33]. Розроблено методи прогнозування осідань та критерії оцінки їх допустимості для різних типів споруд.

Застосування геоінформаційних систем (ГІС) для управління даними про осідання поверхні при будівництві тунелів досліджено у [34]. Продемонстровано можливості ГІС для інтеграції даних з різних джерел, візуалізації результатів моніторингу та підтримки прийняття рішень щодо коригування параметрів проходки.

Характеристика геотехнічної невизначеності є важливим напрямком сучасних досліджень. У роботі [35] проаналізовано виклики, пов'язані з характеристикою геотехнічних умов на основі обмежених даних. Обговорено можливості застосування методів машинного навчання та байєсівського аналізу для підвищення надійності геотехнічних прогнозів в умовах неповної інформації.

Таким чином, геологічне середовище визначає ключові параметри підземного будівництва та є джерелом основних ризиків і невизначеностей. Класичні роботи з геотехніки заклали фундамент для розуміння поведінки ґрунтів та порід навколо підземних виробок, а сучасні дослідження розвивають ці концепції з урахуванням нових технологій та методів аналізу. Особливу увагу заслуговують питання адаптації класифікаційних систем до конкретних геологічних умов та управління геотехнічною невизначеністю.

1.4 Ризики та небезпечні явища при будівництві тунелів

Будівництво підземних споруд пов'язане з численними ризиками, що можуть призводити до аварій, затримок реалізації проектів та значних фінансових втрат. Аналіз світової статистики аварій при тунелюванні свідчить про те, що, незважаючи на прогрес у технологіях та методах проектування, рівень аварійності залишається значним. Розуміння природи ризиків та механізмів їх реалізації є

необхідною передумовою для розробки ефективних стратегій управління ризиками [36].

У [36] систематизовано підходи до визначення, оцінки та управління ризиками при тунелюванні. Підкреслено принципову відмінність між невизначеністю, пов'язаною з недостатністю даних (*epistemic uncertainty*), та природною мінливістю геологічних умов (*aleatory uncertainty*). Це розмежування має важливе практичне значення, оскільки різні типи невизначеності вимагають різних стратегій управління.

Ці роботи заклали основи системного підходу до аналізу рішень у тунелебудуванні. У ранній публікації [37] продемонстровано застосування методів аналізу рішень до планування геологічної розвідки при будівництві тунелів. Показано, як формалізовані методи можуть допомогти визначити оптимальний обсяг досліджень з урахуванням вартості інформації та потенційних наслідків неповного знання геологічних умов.

Подальший розвиток цих ідей представлено у публікаціях [38,39], де аналіз рішень застосовано до планування геологічної розвідки з урахуванням невизначеності. Розроблено формальну модель для оцінки альтернативних стратегій дослідження та визначення оптимального розподілу ресурсів між різними методами розвідки. Особливу увагу приділено питанням оцінки цінності інформації та врахування ризиків при прийнятті рішень.

Байєсівські мережі стали потужним інструментом для аналізу ризиків у тунелебудуванні. У роботі [40] продемонстровано застосування цього підходу на прикладі будівництва метрополітену в місті Порту. Розроблено байєсівську мережу для оцінки ймовірності різних сценаріїв розвитку подій при тунелюванні та прийняття рішень щодо вибору методу проходки. Перевагою байєсівських мереж є можливість інтеграції експертних оцінок та емпіричних даних, а також оновлення оцінок ризику в міру надходження нової інформації.

Міжнародні стандарти управління ризиками при тунелюванні систематизовані в рекомендаціях Міжнародної асоціації тунелювання [15], які охоплюють усі

етапи життєвого циклу тунельного проекту. Рекомендації визначають загальну методологію ідентифікації, оцінки та контролю ризиків, а також розподіл відповідальності між учасниками проекту.

Оновлений Кодекс практики з управління ризиками тунельних робіт [16] відображає накопичений за два десятиліття досвід застосування систем управління ризиками в галузі. Він приділяє особливу увагу питанням геотехнічних ризиків, координації між замовником, проектувальником та підрядником, а також механізмам розподілу ризиків у контрактних відносинах. Важливим елементом є вимоги до реєстру ризиків та регулярного перегляду оцінок ризику протягом реалізації проекту.

Сучасні дослідження пропонують нові підходи до оцінювання ризиків під час тунелювання. У [41] розроблено інтегрований метод аналізу ризиків, що поєднує метод найкращий–найгірший (Best–Worst Method, BWM) для визначення ваг критеріїв та аналіз оболонки даних (Data Envelopment Analysis, DEA) для оцінювання ефективності заходів з управління ризиками. Показано застосування підходу на прикладі будівництва тунелів із використанням тунелепрохідного щита (TBM).

У дослідженні [42] запропоновано багатомасштабний підхід до оцінки безпеки будівництва тунелів на прикладі офшорного тунелю у китайському місті Нінбо. Розглянуто ризики на різних рівнях — від окремих операцій до проекту в цілому — та розроблено відповідні методи їх оцінки та управління. Особливу увагу приділено специфічним ризикам, пов'язаним з підводним тунелюванням.

У [43] розроблено підхід до оцінювання ризиків підземного тунельного будівництва на основі піфагорових нечітких множин та байєсівських мереж. Цей підхід дозволяє враховувати невизначеність експертних оцінок та моделювати складні причинно-наслідкові зв'язки між факторами ризику. Продемонстровано застосування методу для реального проекту будівництва метрополітену.

Динамічні моделі оцінки ризику дозволяють враховувати зміну умов протягом реалізації проекту. У [44] запропоновано триетапну динамічну модель ризику

для будівництва метрополітену щитовим способом. Модель включає етапи ідентифікації, оцінки та контролю ризиків і передбачає регулярне оновлення оцінок з урахуванням нової інформації та фактичного прогресу робіт.

Будівництво тунелів у лесових ґрунтах пов'язане зі специфічними ризиками, обумовленими особливостями цих ґрунтів. У [45] розроблено метод оцінки ризиків безпеки будівництва лесових тунелів на основі теорії ігор та хмарних моделей. Враховано взаємодію різних факторів ризику та невизначеність в їх оцінці, що особливо актуально для складних геологічних умов Китаю.

Карстові умови створюють особливі виклики для тунелебудування через наявність порожнин, підземних водотоків та нестабільних зон. У [46] запропоновано двовимірну хмарну модель для оцінки ймовірності ризиків при щитовому тунелюванні в карстових районах. Модель дозволяє враховувати як об'єктивні характеристики карстових явищ, так і невизначеність у їх оцінці.

Вплив підземного будівництва на навколишнє середовище є важливим аспектом управління ризиками. Віб्राції, що генеруються при проходці тунелів, можуть негативно впливати на існуючі будівлі та інфраструктуру. Методи зменшення вібрацій від залізничного руху за допомогою бар'єрів або покращення ґрунту вздовж колії досліджено у [47]. Розроблено чисельні моделі для прогнозування ефективності різних заходів з віброзахисту.

У дослідженні [48] було розроблено інструментарій планування підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору на основі системної методології (на прикладі м. Києва).

У дослідженні [49] систематизовано методи зменшення вібрацій від залізничного транспорту на різних рівнях — на рівні колії, у ґрунті та на рівні будівлі. Проаналізовано ефективність різних технічних рішень та розроблено рекомендації щодо їх оптимального застосування.

Віб्राції від вибухових робіт при тунелюванні потребують особливої уваги. У дослідженні [50] проаналізовано закономірності поширення вібрацій при буровибуховому способі проходки та розроблено методи прогнозування їх впливу на

навколишнє середовище. Запропоновано критерії допустимих рівнів вібрацій для різних типів споруд.

У дослідженні [51] розглянуто питання вібрацій та перевипромінюваного шуму в будівлях від залізничного руху. Проведено параметричне дослідження впливу різних факторів на рівень вібрацій та запропоновано методи їх зменшення.

Чисельні моделі для прогнозування вібрацій від високошвидкісних залізниць на насипах розроблено у [52]. Проаналізовано вплив швидкості руху, властивостей ґрунту та конструкції насипу на рівень вібрацій.

Ефективність хвильових бар'єрів для захисту від вібрацій досліджено експериментально та чисельно [53]. Продемонстровано можливості жорстких бар'єрів у ґрунті для зменшення вібрацій та визначено оптимальні параметри таких бар'єрів.

За допомогою центрифужного моделювання та чисельних методів [54] досліджено вібрації від підземних тунелів. Проаналізовано механізми генерації та поширення вібрацій та їх вплив на поверхневі споруди.

У дослідженні [55] розглянуто принципи ризик-орієнтованого проектування в геотехніці скельних порід. Обґрунтовано необхідність систематичного врахування невизначеностей при проектуванні підземних споруд та запропоновано практичні підходи до реалізації цих принципів.

Прогнозування продуктивності ТВМ є активною областю досліджень, що використовує сучасні методи машинного навчання. У дослідженні [56] розроблено модель прогнозування продуктивності ТВМ на основі глибокого навчання з використанням великих обсягів даних. Показано, що методи *deep learning* можуть забезпечити більш точні прогнози порівняно з традиційними емпіричними моделями.

У [57] запропоновано підхід до випереджаючого прогнозування умов тунелювання на основі аналізу великих даних. Використано дані з операційних систем ТВМ для виявлення закономірностей, що дозволяють прогнозувати геологічні

умови попереду вибою. Цей підхід дозволяє зменшити невизначеність у реальному часі в процесі проходки.

У [58] розроблено автоматизований підхід до динамічного прогнозування та багатокритеріальної оптимізації положення ТВМ. Використано методи глибокого навчання для оптимізації параметрів проходки в реальному часі, що дозволяє адаптувати технологію до мінливих геологічних умов.

У [59] розроблено модель автоматизованого розпізнавання геомеханічної інформації на основі операційних даних ТВМ. Цей підхід дозволяє ідентифікувати тип порід та їх характеристики в процесі проходки, що зменшує невизначеність та дозволяє своєчасно коригувати параметри технології.

У [60] запропоновано гібридні інтелектуальні моделі для прогнозування швидкості проникнення ТВМ у твердих породах. Порівняно різні методи машинного навчання та визначено оптимальні підходи для конкретних геологічних умов.

У роботі [61] запропоновано застосування когнітивного моделювання для аналізу факторів, що впливають на планування тунельних споруд в умовах невизначеності. Когнітивні карти дозволяють формалізувати знання експертів про складні взаємозв'язки між факторами та аналізувати їх вплив на результати проекту.

Подальший розвиток методології представлено у [62], де розглянуто підхід до аналізу та моделювання планування тунелів в умовах невизначеності з урахуванням загроз воєнного характеру. Інтегровано методи когнітивного моделювання з підходами до управління ризиками та прийняття рішень, що утворює цілісну методологію для підтримки стратегічного планування підземних проектів.

У публікації [63] досліджено специфіку планування підземної інфраструктури великих міст в умовах невизначеності. Проаналізовано джерела невизначеності та ризиків характерні для українських умов, та запропоновано підходи до їх врахування при обґрунтуванні проектних рішень.

Таким чином, управління ризиками є невід’ємною складовою сучасного підходу до планування та реалізації тунельних проектів. Розвиток теорії ризик-аналізу забезпечив формування методологічної бази для систематичної роботи з ризиками. Сучасні дослідження пропонують нові інструменти для оцінки ризиків в умовах невизначеності, динамічного моніторингу та прийняття обґрунтованих рішень. Важливим напрямком залишається врахування впливу підземного будівництва на навколишнє середовище.

1.5 Техніко-економічні аспекти та сучасні технології планування

Економічна ефективність підземного будівництва є ключовим фактором, що визначає можливість реалізації проектів та вибір технічних рішень. Вартість тунельного будівництва традиційно є однією з найвищих серед усіх видів інфраструктурних проектів, що обумовлює необхідність ретельного економічного аналізу та оптимізації на всіх етапах планування. Водночас розвиток технологій створює нові можливості для підвищення ефективності та зменшення вартості підземних проектів.

Структура вартості тунельного проекту включає численні компоненти: витрати на геологічні дослідження, проектування, придбання або оренду обладнання, матеріали, робочу силу, управління проектом та непередбачені витрати. Значну частку вартості становлять витрати, пов’язані з геологічним ризиком — додаткові роботи через несприятливі умови, затримки, зміни технології проходки. Врахування ризиків при плануванні дозволяє оптимізувати загальну вартість проекту, включаючи як прямі витрати на будівництво, так і потенційні втрати від несприятливих подій [36].

Вибір методу проходки є одним з ключових техніко-економічних рішень при плануванні тунельного проекту. Застосування тунелепрохідницьких комплексів (ТВМ) забезпечує високу продуктивність та безпеку робіт, однак вимагає значних початкових інвестицій та є чутливим до геологічних умов. Фактори, що

впливають на ефективність застосування ТВМ у різних геологічних умовах, та критерії вибору типу машини проаналізовано у [32].

Прогнозування продуктивності ТВМ є критично важливим для економічного обґрунтування проектів. Традиційні емпіричні моделі ґрунтуються на кореляції між характеристиками порід та швидкістю проходки. У [56] продемонстровано можливості методів глибокого навчання для більш точного прогнозування продуктивності на основі великих обсягів даних з реальних проектів.

Підхід до випереджаючого прогнозування умов тунелювання [57] дозволяє оптимізувати параметри проходки та зменшити непередбачені витрати. Використання даних у реальному часі для коригування прогнозів є перспективним напрямком підвищення ефективності тунельного будівництва.

Цифрова трансформація будівельної галузі створює нові можливості для підвищення ефективності підземного будівництва. Інформаційне моделювання будівель (BIM) стає стандартним інструментом для проектування, будівництва та експлуатації інфраструктурних об'єктів, включаючи тунелі. BIM забезпечує інтеграцію даних з різних джерел, візуалізацію проектних рішень, виявлення колізій та підтримку прийняття рішень на всіх етапах життєвого циклу проекту.

Методи інтеграції геопросторових даних з BIM-моделями [18] забезпечують ефективну підтримку проектування та управління будівництвом тунелів, зокрема семантичне зв'язування даних з різних джерел.

Інформаційні вимоги до BIM-моделей тунелів для забезпечення ефективного управління експлуатацією визначено у [19].

Застосування методів машинного навчання для оптимізації підземного будівництва є активною областю досліджень. Автоматизований підхід до динамічного прогнозування та багатокритеріальної оптимізації параметрів проходки ТВМ розроблено у [58]. Продemonстровано можливість оптимізації в реальному часі на основі даних з бортових систем машини.

Модель автоматизованого розпізнавання геомеханічної інформації на основі операційних даних ТВМ запропоновано у [59]. Можливість ідентифікації

геологічних умов безпосередньо в процесі проходки відкриває нові перспективи для адаптивного управління будівництвом та зменшення витрат, пов'язаних з несприятливими умовами.

Порівняння ефективності різних методів машинного навчання для прогнозування продуктивності ТВМ у твердих породах проведено у [60]. Визначено оптимальні підходи для різних умов та запропоновано гібридні моделі, що поєднують переваги різних методів.

Методологія когнітивного моделювання пропонує інноваційний підхід до підтримки прийняття стратегічних рішень у підземному будівництві. Стратегію планування об'єктів підземного будівництва на основі передбачення та когнітивного моделювання розроблено у [64]. Інтегровано методи передбачення майбутнього розвитку з аналізом складних систем факторів, створено комплексний підхід до стратегічного планування.

Подальший розвиток методології представлено в роботі [20], де системний підхід до планування підземного будівництва поєднано з методологіями форсайту та когнітивного моделювання. Обґрунтовано застосування когнітивних карт для аналізу взаємозв'язків між факторами розвитку підземної інфраструктури.

Когнітивне моделювання для оцінки придатності ділянок для підземного будівництва досліджено у [65]. Розроблено методику аналізу багатьох факторів — геологічних, економічних, соціальних, екологічних — та їх впливу на прийнятність того чи іншого рішення. Когнітивні карти дозволяють формалізувати експертні знання та аналізувати складні причинно-наслідкові зв'язки.

Метод морфологічного аналізу для генерації альтернативних конфігурацій підземних переходів через водні об'єкти запропоновано у [66]. Цей підхід дозволяє систематизувати пошук проектних рішень шляхом комбінування значень ключових параметрів та обґрунтувати вибір оптимального варіанту.

Теоретичні основи когнітивного моделювання для аналізу складних систем закладено у [67]. Теорія графів та її застосування для аналізу соціальних систем

забезпечили математичний фундамент для розвитку методів когнітивного моделювання в різних предметних областях, включаючи інженерне планування.

Методологічні основи передбачення та когнітивного моделювання для інноваційного розвитку соціально-економічних систем систематизовано в колективній монографії [68]. Ця робота узагальнює досвід застосування когнітивного моделювання для аналізу складних систем та підтримки стратегічного планування.

Концепція підземного урбанізму як системи альтернативних проектних конфігурацій розглянута у [69]. Запропоновано підхід до формування альтернативних варіантів розвитку підземного простору міста з урахуванням різних сценаріїв майбутнього розвитку.

Проблеми планування підземної інфраструктури належать до класу слабкоструктурованих задач, що характеризуються неповнотою, неточністю та невизначеністю вихідних даних. На відміну від задач з кількісними значеннями змінних, які вирішуються методами дослідження операцій та економетрики, слабкоструктуровані задачі потребують специфічних методів підтримки прийняття рішень.

Для вирішення слабкоструктурованих задач планування в Інституті прикладного системного аналізу КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблено інформаційну платформу сценарного аналізу (ІПІСА). Теоретичні основи системного аналізу [70] стали фундаментом для розробки цієї платформи. ІПІСА є комплексом математичних, програмних, логічних та організаційно-технічних засобів для здійснення цілісного процесу передбачення на основі інтерактивної взаємодії експертів та програмно-технічного середовища. Платформа забезпечує збір експертних оцінок через мережу Інтернет у режимі онлайн та інтегрує різні методи якісного аналізу в єдиній людино-машинній процедурі.

Серед формалізованих методів якісного аналізу, що застосовуються для планування підземної інфраструктури, особливе місце посідає метод аналізу ієрархій (MAI) [71]. Моделі та методи аналізу ієрархій систематизовано у [72], де розроблено теоретичні основи та практичні застосування цього підходу для

вирішення задач багатокритеріального вибору. Метод дозволяє структурувати складну проблему у вигляді ієрархії, оцінити відносну важливість критеріїв та альтернатив на основі парних порівнянь експертів і синтезувати загальні пріоритети альтернатив.

Метод BOCR-аналізу (Benefits-Opportunities-Costs-Risks) дозволяє враховувати не лише вигоди, але й можливості, витрати та ризики альтернативних рішень. В роботі [73] застосовано метод BOCR для оцінювання моделей розвитку підземної транспортної інфраструктури з урахуванням екологічних і техногенних ризиків. Цей підхід забезпечує комплексну оцінку альтернатив з урахуванням як позитивних, так і негативних факторів впливу.

Метод Делфі є ще одним важливим інструментом експертного оцінювання при плануванні підземних проєктів. У [74] розроблено методологію та практичні рекомендації щодо застосування методу Делфі для отримання узгоджених експертних оцінок в умовах невизначеності. Метод передбачає проведення кількох раундів анонімного опитування експертів з наданням зворотного зв'язку про результати попередніх раундів, що дозволяє досягти консенсусу щодо оцінок складних параметрів.

Підхід до моделювання сценаріїв планування підземного будівництва на основі інтеграції методологій передбачення та когнітивного моделювання розроблено у [75], де запропоновано двоетапну модель, де на першому етапі застосовуються методи сканування, STEEP-аналізу, мозкового штурму та SWOT-аналізу для виявлення критичних факторів, а на другому етапі результати використовуються для побудови когнітивних карт та аналізу сценаріїв розвитку системи.

Стратегію моделювання складних ієрархічних систем на основі методологій передбачення та когнітивного моделювання обґрунтовано у [76]. Продемонстровано, що поєднання методів якісного аналізу з когнітивним моделюванням дозволяє запропонувати науково обґрунтовану стратегію реалізації пріоритетної альтернативи сценарію планування. Пріоритети розвитку підземної інфраструктури мегаполісів на основі системної методології визначено у [77],

де інтегровано експертне оцінювання, багатокритеріальний аналіз та когнітивне моделювання.

Методику оцінки екологічних і техногенних ризиків при плануванні підземного простору великих міст розроблено у [78]. Методика базується на системному аналізі факторів ризику та їх взаємозв'язків, що дозволяє обґрунтовувати управлінські рішення щодо мінімізації негативних наслідків підземного будівництва.

Таким чином, техніко-економічна ефективність підземного будівництва визначається комплексом факторів, що охоплюють технологію проходки, геологічні умови, управління ризиками та організацію проекту. Цифрова трансформація галузі створює нові можливості для оптимізації на основі інформаційного моделювання та методів машинного навчання. Когнітивне моделювання пропонує інноваційний підхід до підтримки стратегічного планування з урахуванням складних взаємозв'язків між факторами розвитку.

1.6 Аналіз існуючих підходів та постановка наукової задачі

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє систематизувати існуючі підходи до планування підземної інфраструктури та визначити напрямки їх подальшого розвитку. Сучасний стан досліджень характеризується значним накопиченням знань у різних аспектах підземного будівництва — від фундаментальних питань механіки гірських порід до прикладних методів управління ризиками. Водночас інтеграція цих знань у цілісну методологію планування залишається актуальним завданням.

Класичні роботи з геотехніки та тунелебудування [21–27] заклали фундамент для розуміння поведінки гірських порід та проектування підземних споруд. Системи класифікації гірських порід RMR та Q-system забезпечують практичний інструментарій для оцінки умов тунелювання та вибору параметрів кріплення. Водночас сучасні дослідження [28–30] вказують на обмеження цих систем та необхідність їх адаптації до конкретних геологічних умов.

Теорія ризик-аналізу в тунелебудуванні отримала значний розвиток [36–40]. Формалізовані методи аналізу рішень забезпечують теоретичну основу для врахування невизначеності при плануванні підземних проектів. Байєсівські мережі [40] дозволяють інтегрувати різні джерела інформації та оновлювати оцінки ризику в процесі реалізації проекту.

Міжнародні стандарти управління ризиками [15, 16] систематизують кращі практики галузі та визначають загальні принципи ідентифікації, оцінки та контролю ризиків. Водночас ці рекомендації мають досить загальний характер і потребують адаптації до специфіки конкретних проектів та умов.

Сучасні дослідження ризиків при тунелюванні [41–46] пропонують нові методи оцінки, що враховують нечіткість інформації, динаміку розвитку ситуації та специфіку різних геологічних умов. Ці методи розширюють можливості аналізу ризиків, однак їх практичне застосування потребує інтеграції в загальну систему планування проекту.

Методи машинного навчання [56–60] відкривають нові можливості для прогнозування умов тунелювання та оптимізації технології на основі великих обсягів даних. Водночас ці методи зосереджені переважно на оперативному рівні управління і не охоплюють стратегічних аспектів планування підземних проектів.

Досвід планування підземного простору в різних країнах [4–11] демонструє різноманітність підходів та важливість врахування національної специфіки. Провідні країни розробили комплексні системи підземного планування, що інтегрують технічні, економічні та соціальні аспекти. Для України актуальним є формування власної системи планування з урахуванням кращих світових практик.

Когнітивне моделювання [20, 61–69] пропонує підхід до аналізу складних систем факторів, що впливають на планування підземних споруд. Когнітивні карти дозволяють формалізувати експертні знання та аналізувати прямі й опосередковані впливи між факторами. Водночас потребують розвитку методи аналізу структурної стійкості когнітивних моделей та врахування невизначеності у визначенні параметрів.

Аналіз стану досліджень дозволяє виявити такі невирішені проблеми та обмеження існуючих підходів:

- існуючі підходи до аналізу когнітивних карт недостатньо враховують питання їх структурної цілісності моделей. Необхідною є розробка методів симпліціального аналізу та модулярності при побудові моделей когнітивних карт;
- традиційні методи недостатньо враховують невизначеність якісного характеру, пов'язану з неповнотою знань про систему досліджувану проблему та нечіткістю експертних оцінок. Необхідним є розвиток методів, що дозволяють формалізувати та аналізувати таку невизначеність різної природи;
- існуючі методи аналізу ризиків переважно зосереджені на окремих аспектах - геотехнічних, технологічних, економічних - без комплексного врахування їх взаємозв'язків. Необхідною є розробка методології, що охоплює систему факторів у їх взаємодії;
- потребує подальшого розвитку методологія ідентифікації ключових факторів та їх угруповання для проведення достовірного аналізу складних когнітивних моделей, а також обґрунтування вагових коефіцієнтів у таких угрупованнях. Залучення методів виявлення спільнот у графах можуть бути адаптовані для цієї мети.

На основі проведеного аналізу сформульовано **мету дослідження**: розробка методології планування підземної інфраструктури великих міст на основі когнітивного моделювання з залученням обґрунтування структурної стійкості на базі симпліціального аналізу, виявлення спільнот та аналізу модулярності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі дослідження**:

1. Проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку методів планування підземної інфраструктури, дослідити існуючі підходи до їх вирішення.
2. Розробити методологію побудови когнітивних моделей планування підземних споруд з врахуванням чисельної та структурної стійкості.

3. Розробити методи аналізу цілісності когнітивних карт на основі виявлення циклів та симпліціального аналізу.
4. Адаптувати методи виявлення спільнот для ідентифікації функціональних груп факторів у когнітивних картах планування підземної інфраструктури.
5. Розробити програмне забезпечення імпульсного когнітивного моделювання та верифікувати запропоновану методологію на реальних даних.
6. Побудувати та дослідити сценарії терористичного антропогенного та природного характерів.

Об'єктом дослідження є процеси планування підземної інфраструктури великих міст в умовах невизначеності.

Предметом дослідження є методи та моделі когнітивного моделювання для оцінювання планування підземної інфраструктури великих міст.

1.7 Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану планування та розвитку підземної інфраструктури мегаполісів. На основі аналізу літературних джерел отримано такі результати та висновки:

1. Проаналізовано глобальні тенденції урбанізації та обґрунтовано зростаючу роль підземного простору щодо забезпечення сталого розвитку міст. Показано, що концентрація населення в мегаполісах вимагає активного освоєння підземного простору для розміщення у військовий час населення, транспортної, комунальної та інженерної інфраструктури. Сформульовано концепцію сталого підземного урбанізму як системного підходу до планування підземного простору.
2. Систематизовано світовий досвід планування підземного простору на прикладі Китаю, Німеччини, Фінляндії та Індії. Виявлено спільні тенденції: інтеграція підземного планування в загальну систему містобудівного регулювання; розвиток нормативно-правової бази; застосування цифрових

технологій; посилення уваги до управління ризиками. Проаналізовано міжнародні стандарти ІТА щодо управління ризиками при тунелюванні.

3. Розглянуто вплив геологічного середовища на підземне будівництво. Проаналізовано класичні роботи з геотехніки [21–25,27] та сучасні дослідження класифікаційних систем. Показано обмеження традиційних підходів та необхідність їх адаптації до конкретних геологічних умов. Систематизовано методи попередньої геологічної розвідки при будівництві тунелів.
4. Проаналізовано ризики та небезпечні явища при будівництві тунелів. Розглянуто теоретичні основи ризик-аналізу [36], методи байєсівського аналізу та сучасні підходи до оцінки ризиків на основі нечітких множин, хмарних моделей та теорії ігор. Систематизовано питання впливу підземного будівництва на навколишнє середовище, включаючи вібрації, шум та осідання поверхні.
5. Досліджено природу та джерела невизначеності при плануванні підземних споруд. Розмежовано епістемологічну та алеаторну невизначеність. Проаналізовано методи машинного навчання для прогнозування умов тунелювання та оптимізації технології. Обґрунтовано застосування когнітивного моделювання для аналізу складних систем в умовах невизначеності.
6. Розглянуто техніко-економічні аспекти підземного будівництва та сучасні технології планування. Проаналізовано застосування BIM-технологій для проектування та експлуатації тунелів. Систематизовано підходи до когнітивного моделювання для підтримки стратегічного планування підземних проектів.
7. На основі аналізу виявлено невирішені проблеми: недостатня інтеграція різних аспектів аналізу ризиків; обмежене врахування якісної невизначеності; відсутність методів аналізу структурної цілісності когнітивних моделей; відсутність методів ідентифікації груп щільно взаємопов'язаних елементів системи, та обґрунтування кількісних характеристик когнітивних карт.

8. Сформульовано мету та задачі дисертаційного дослідження, спрямованого на розробку методології оцінювання планування підземної інфраструктури великих міст на основі когнітивного моделювання.

2 ПОБУДОВА КОГНІТИВНОЇ МОДЕЛІ СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ. ОБҐРУНТУВАННЯ ЧИСЕЛЬНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СТІЙКОСТІ

Моделювання складних систем, до яких належать системи планування підземної інфраструктури, потребує застосування спеціальних методологічних підходів, здатних враховувати множинність факторів впливу, невизначеність вхідної інформації та динамічний характер процесів. У цьому розділі розглядається методологія когнітивного моделювання як інструмент дослідження складних слабко-структурованих систем, що дозволяє формалізувати експертні знання, виявляти причинно-наслідкові зв'язки та розробляти сценарії розвитку ситуацій [64, 68].

Когнітивне моделювання є потужним інструментом системного аналізу, що поєднує формальні математичні методи з можливістю врахування експертних оцінок та якісної інформації [67]. Когнітивні моделі здатні відображати не лише кількісні характеристики системи, але й якісні взаємозв'язки між її елементами, що є особливо важливим для систем з високим рівнем невизначеності [70].

Застосування когнітивного моделювання до задач планування підземної інфраструктури обумовлено рядом факторів. По-перше, такі задачі характеризуються значною невизначеністю геологічних, технічних та економічних параметрів. По-друге, існує складна система взаємозв'язків між різними факторами впливу, що унеможлиблює застосування простих лінійних моделей. По-третє, прийняття рішень у цій сфері потребує врахування експертних знань фахівців різного профілю — геологів, інженерів-будівельників, економістів, екологів [65].

Системна методологія, що застосовується в даному дослідженні (рис 2.1), ґрунтується на двоетапному системному підході: спочатку виконується процес передбачення для отримання достовірних вихідних даних, а потім здійснюються процедури когнітивного моделювання для аналізу властивостей системи та розробки сценаріїв її розвитку [76]. Такий підхід забезпечує обґрунтованість отриманих результатів та результатів прогнозів.



Рис. 2.1 – Системний підхід до оцінювання критичної підземної інфраструктури

2.1 Методологія отримання вихідних даних для когнітивного моделювання

Якість когнітивної моделі безпосередньо залежить від достовірності та повноти вихідних даних, на основі яких вона будується. У задачах планування підземної інфраструктури вихідна інформація характеризується високим рівнем невизначеності, різноманітністю джерел та часто суперечливим характером [20]. Для отримання достовірних вихідних даних застосовується методологія передбачення (форсайту), яка забезпечує систематичний збір, аналіз та узагальнення інформації з різних джерел [68].

Процес передбачення є комплексом методів та процедур, спрямованих на виявлення довгострокових тенденцій розвитку, ідентифікацію ключових факторів впливу та формування бази знань для подальшого моделювання. Такий підхід

направлений на системне дослідження можливих альтернатив розвитку та формування стратегій реагування на різні сценарії [75].

2.1.1 Методи якісного аналізу в процесі передбачення

Серед основних методів, що застосовуються на етапі передбачення, слід виділити наступні [68, 74]:

Метод сканування забезпечує систематичний моніторинг зовнішнього середовища з метою виявлення ранніх ознак змін та нових тенденцій. У контексті планування підземної інфраструктури сканування охоплює аналіз технологічних інновацій у тунелебудуванні, зміни нормативно-правової бази, екологічних вимог та соціальних очікувань [11].

Метод STEEP-аналізу передбачає структурований розгляд соціальних (Social), технологічних (Technological), економічних (Economic), екологічних (Environmental) та політичних (Political) факторів, що впливають на досліджувану систему, що дозволяє систематизувати різномірну інформацію [70].

Метод мозкового штурму застосовується для глибокого та інтенсивного вивчення проблеми у вузьких напрямках. Це надає можливість відібрати ідеї та підходи, що буде використано на наступних етапах процесу передбачення.

Метод SWOT-аналізу забезпечує структурований аналіз сильних сторін (Strengths), слабких сторін (Weaknesses), можливостей (Opportunities) та загроз (Threats) для досліджуваного об'єкта. Результати SWOT-аналізу є важливим джерелом інформації для виявлення істотних внутрішніх і зовнішніх чинників системи, які впливають на організаційні і технологічні стратегії [20].

Метод перехресного впливу дозволяє оцінити взаємний вплив різних факторів та подій на досліджувану систему. Експерти оцінюють ймовірність настання певних подій та їх вплив на інші фактори, що формує основу для побудови матриці взаємозв'язків когнітивної карти [72].

Метод Делфі є ітеративною експертною процедурою, що дозволяє досягти консенсусу групи експертів щодо оцінки невизначених параметрів. Метод передбачає проведення кількох раундів опитування з наданням експертам зворотного

зв'язку щодо узагальнених результатів попередніх раундів. Це дозволяє знизити вплив домінуючих особистостей та отримати більш збалансовані оцінки [74].

Метод морфологічного аналізу застосовується для систематичного дослідження всіх можливих комбінацій параметрів досліджуваної системи. Морфологічна таблиця містить параметри системи та їх альтернативні значення, а морфологічний простір утворюється всіма можливими комбінаціями альтернатив. Цей метод особливо ефективний для виявлення нетривіальних рішень та оцінки альтернативних конфігурацій [66].

Морфологічна таблиця формалізується як матриця $M = \{m_{ij}\}$, де $i = 1, \dots, k$ — номер параметра системи, $j = 1, \dots, n_i$ — номер альтернативи параметра i . Кожен елемент m_{ij} представляє конкретне значення або стан параметра. Морфологічний простір визначається як декартів добуток множин альтернатив [70]:

$$S = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_k, \quad (2.1)$$

де $A_i = \{m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{in_i}\}$ — множина альтернатив i -го параметра. Потужність морфологічного простору визначається як:

$$|S| = \prod_{i=1}^k n_i. \quad (2.2)$$

Модифікований метод морфологічного аналізу (МММА), передбачає двоетапну процедуру з урахуванням взаємозв'язків між параметрами [66]. На першому етапі будується морфологічна таблиця параметрів першого рівня та визначаються зв'язки між альтернативами. На другому етапі формуються узагальнені показники (елементи рішення), що агрегують результати першого етапу. Така двоетапна процедура дозволяє врахувати ієрархічну структуру досліджуваної проблеми та зменшити розмірність задачі.

Метод аналізу ієрархій (MAI), розроблений Т. Сааті [71], є інструментом багатокритеріального прийняття рішень. Метод передбачає декомпозицію проблеми у вигляді ієрархічної структури з рівнями: мета, критерії, підкритерії та

альтернативи. Елементи кожного рівня порівнюються попарно відносно елементів вищого рівня з використанням шкали Сааті (1–9). На основі матриць парних порівнянь обчислюються локальні та глобальні пріоритети елементів [72].

Математичний апарат МАІ ґрунтується на теорії власних векторів матриць. Для обернено симетричної матриці парних порівнянь $A = [a_{ij}]$, де $a_{ij} = 1/a_{ji}$, вектор пріоритетів w визначається як нормований головний власний вектор матриці A :

$$Aw = \lambda_{max} w, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (2.3)$$

де λ_{max} — найбільше власне число матриці A . Узгодженість експертних оцінок оцінюється за допомогою індексу узгодженості $CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ та відношення узгодженості $CR = CI/RI$, де RI — випадковий індекс [71].

2.1.2 Формування інтегрованого показника даних

У випадках, коли вихідна інформація для когнітивного моделювання задається у статистичній формі або у вигляді окремих логічних груп, застосовується підхід до побудови інтегрованого показника даних [68]. Цей підхід передбачає розбиття підмножини вихідних факторів на групи за ознаками подібності та агрегування їх в узагальнені показники.

Нехай задано множину вихідних факторів $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, що характеризують досліджувану систему. Процедура формування інтегрованого показника включає наступні кроки:

1. Класифікація факторів за групами на основі їх функціонального призначення або природи: $F = G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_m$, де $G_i \cap G_j = \emptyset$ для $i \neq j$.
2. Нормалізація значень факторів до єдиної шкали. Для фактора f_k з діапазоном значень $[f_k^{min}, f_k^{max}]$ нормалізоване значення визначається як:

$$\tilde{f}_k = \frac{f_k - f_k^{min}}{f_k^{max} - f_k^{min}} \quad (2.4)$$

3. Визначення вагових коефіцієнтів факторів на основі експертних оцінок або методу аналізу ієрархій [71].

4. Агрегування факторів у групові показники з використанням адитивної або мультиплікативної згортки.

Результатом процесу передбачення є структурована база знань про досліджувану систему, що включає: перелік ключових факторів впливу (концептів), якісні та кількісні характеристики факторів, матрицю взаємозв'язків між факторами, а також експертні оцінки ваги впливу [64].

2.2 Побудова когнітивної карти складної системи

Когнітивна карта є формалізованим представленням знань про досліджувану систему у вигляді орієнтованого графа, вершини якого відповідають факторам (концептам) системи, а дуги — причинно-наслідковим зв'язкам між ними [67]. Побудова когнітивної карти є першим етапом когнітивного моделювання і становить основу для подальшого аналізу властивостей системи та розробки сценаріїв її розвитку.

2.2.1 Формальне визначення когнітивної карти

Нехай досліджувана система (наприклад, підземна інфраструктура) складається з множини V окремих елементів (факторів). Якщо елемент V_i пов'язаний з елементом V_j причинно-наслідковим зв'язком, то їх з'єднують орієнтованою дугою e_{ij} [68].

Когнітивна карта визначається як знаково-орієнтований граф [65, 67]:

$$G = \langle V, E \rangle, \quad (2.5)$$

де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ — множина вершин (концептів) досліджуваної системи; $E = \{e_{ij}\}$ — множина орієнтованих дуг, які відображають причинно-наслідкові зв'язки між вершинами. Кожній дузі e_{ij} визначається знак: “+” — якщо збільшення (зменшення) значення у вершині v_i призводить до збільшення (зменшення) значення у вершині v_j ; “−” — якщо збільшення (зменшення) значення у вершині v_i призводить до зменшення (збільшення) значення у вершині v_j [61].

Когнітивна карта може бути представлена матрицею суміжності $A_G = [a_{ij}]$, де $a_{ij} \in \{-1, 0, +1\}$ визначає наявність та знак зв'язку від вершини v_i до вершини v_j [68].

2.2.2 Функціональний граф як розширення когнітивної карти

Для більш детального опису взаємовпливів між факторами використовується функціональний граф у вигляді зваженого знакового орграфа [62, 64]:

$$\Phi = \langle G, X, F(X, E), \Theta \rangle, \quad (2.6)$$

де G — когнітивна карта; $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множина параметрів вершин; Θ — простір параметрів вершин; $F(X, E)$ — функціонал перетворення дуг, що визначає силу впливу.

Функціонал перетворення дуг визначається наступним чином [68]:

$$F(X, E) = F(x_i, x_j, e_{ij}) = \begin{cases} +w_{ij}, & \text{якщо збільшення (зменшення) } x_i \\ & \text{веде до збільшення (зменшення) } x_j; \\ -w_{ij}, & \text{якщо збільшення (зменшення) } x_i \\ & \text{веде до зменшення (збільшення) } x_j, \end{cases} \quad (2.7)$$

де $w_{ij} \in (0, 1]$ — ваговий коефіцієнт, що характеризує силу впливу вершини v_i на вершину v_j .

Зважений функціональний граф представляється матрицею суміжності $W = [w_{ij}]$, де $w_{ij} \in [-1, +1]$ визначає знак та силу зв'язку. При $w_{ij} = 0$ зв'язок між вершинами відсутній [61].

2.2.3 Процедура побудови когнітивної карти

Побудова когнітивної карти здійснюється за наступною процедурою [64]:

Крок 1. Визначення меж системи. На основі аналізу проблемної ситуації визначаються межі досліджуваної системи та її взаємодія із зовнішнім середовищем.

Крок 2. Ідентифікація факторів (концептів). На основі результатів процесу передбачення формується перелік ключових факторів, що впливають на досліджувану систему. Кожен фактор має бути чітко визначений та вимірюваний.

Крок 3. Класифікація факторів. Фактори класифікуються за їх роллю в системі:

- індикативні фактори — показники, що характеризують стан системи;
- збурюючі фактори — показники, на які можна безпосередньо впливати;
- регулюючі фактори — показники, що передають вплив від керуючих до цільових;
- базові фактори — зовнішні та внутрішні фактори, що описують основні характеристики системи та її оточення [68].

Крок 4. Встановлення причинно-наслідкових зв’язків. Для кожної пари факторів визначається наявність та характер причинно-наслідкового зв’язку. Експерти відповідають на питання: “Чи веде зміна фактора v_i до зміни фактора v_j ?” [65].

Крок 5. Оцінка сили зв’язків. Для побудови зваженого функціонального графа експерти оцінюють силу кожного зв’язку.

Крок 6. Формування матриці суміжності. На основі отриманих даних формується матриця суміжності когнітивної карти $W = [w_{ij}]$.

2.2.4 Ієрархічна когнітивна карта

Для моделювання складних багаторівневих систем використовується ієрархічна когнітивна карта (рис. 2.2) [64]:

$$G^H = \langle G^{(1)}, G^{(2)}, \dots, G^{(k)}, R \rangle, \quad (2.8)$$

де $G^{(l)} = \langle V^{(l)}, E^{(l)} \rangle$ — когнітивна карта l -рівня; $V^{(l)}$ — множина вершин l -рівня; R — множина відношень між вершинами різних рівнів.

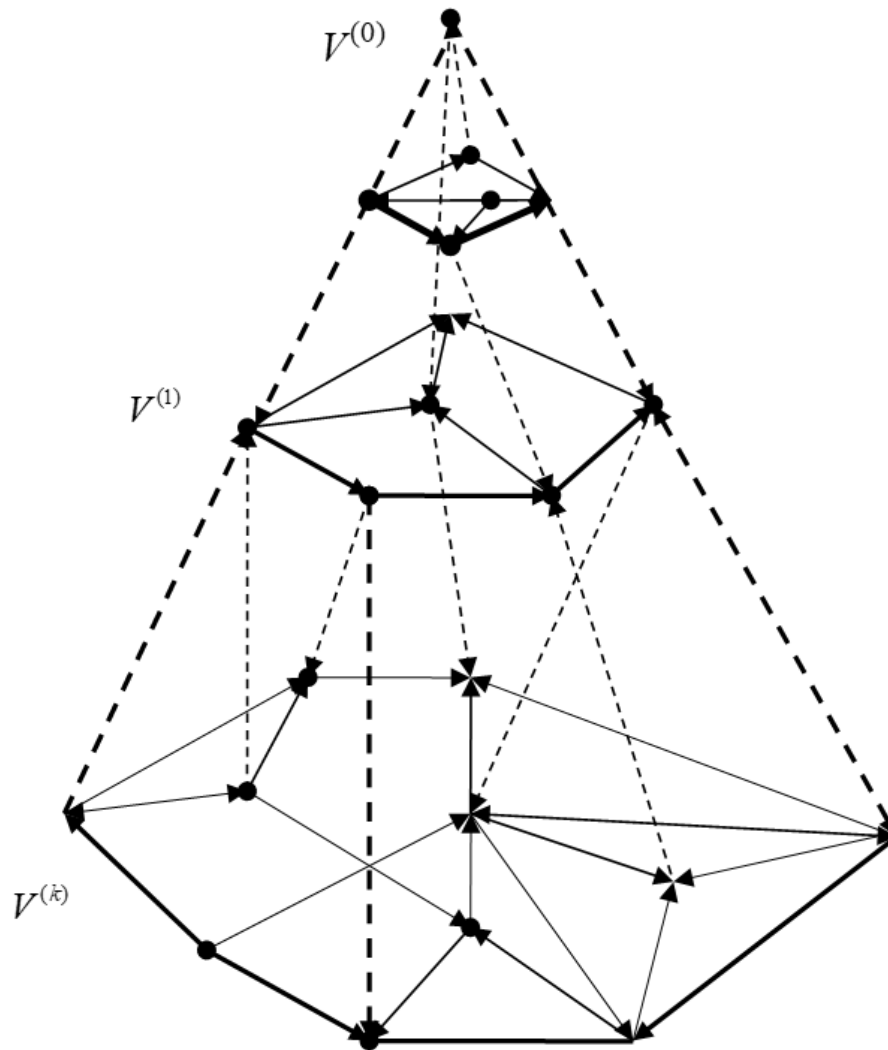


Рис. 2.2 – Структура складної системи у вигляді ієрархічної когнітивної карти

Ієрархічна структура дозволяє декомпонувати складну систему на підсистеми, що спрощує аналіз та підвищує інтерпретованість результатів [68]. Відносини між вершинами одного рівня визначаються дугами $E^{(l)}$, а відносини між вершинами різних рівнів — дугами з множини R .

Приклад візуалізації когнітивної карти у вигляді ієрархічної структури зображено на рисунку 2.2.

2.3 Етапи розробки когнітивної моделі складної системи

Побудова когнітивної моделі здійснюється поетапно, де кожен етап має чітко визначену мету та результат. У даному дослідженні, використано наступні етапи побудови когнітивної моделі:

Етап 1. Побудова когнітивної карти. На цьому етапі формується структура системи. Вершини графа і дуги визначаються на основі результатів процесу передбачення та експертного аналізу предметної області. Результатом є знакова когнітивна карта або зважений функціональний граф [68].

Етап 2. Обґрунтування структурної стійкості. Аналіз структурної стійкості передбачає дослідження циклічної структури когнітивної карти. Виявляються цикли позитивного та негативного зворотного зв'язку, оцінюється їх кількісне співвідношення. Структурна стійкість є необхідною умовою для моделювання сценаріїв для реальної системи [68]. Детальний опис методів аналізу структурної стійкості наведено у підрозділі 2.4.

Етап 3. Обґрунтування чисельної стійкості. Чисельна стійкість когнітивної моделі визначається на основі аналізу власних чисел матриці суміжності графа. Застосовується критерій Ляпунова, згідно з яким модель є стійкою, якщо спектральний радіус матриці суміжності менший за одиницю [65, 68]. Методи аналізу чисельної стійкості детально розглядаються у підрозділі 2.5.

Етап 4. Обґрунтування цілісності системи за допомогою симпліціального аналізу та аналіз спільнот на основі модулярності. Цей етап передбачає дослідження топологічних властивостей когнітивної карти методами алгебраїчної топології (симпліціальний аналіз) та виявлення кластерної структури системи методами максимізації модулярності. Симпліціальний аналіз дозволяє оцінити зв'язність системи та виявити її структурні особливості. Методи аналізу модулярності забезпечують виявлення природних угруповань факторів (спільнот), що мають більш щільні внутрішні зв'язки порівняно із зовнішніми, та дозволяє обґрунтувати достовірність кількісних вагових характеристик. Детальний розгляд цих методів подано у розділі 3 даної роботи.

2.4 Аналіз структурної стійкості когнітивної карти

Структурна стійкість когнітивної карти визначається співвідношенням циклів позитивного та негативного зворотного зв'язку в структурі графа [65, 68]. Аналіз

циклів є важливим етапом дослідження когнітивної моделі, оскільки дозволяє перевірити, чи не суперечать замкнені причинно-наслідкові контури знанням про реальну систему, та оцінити тенденції її поведінки.

2.4.1 Класифікація циклів когнітивної карти

Циклом у когнітивній карті називається замкнений шлях, що починається і закінчується в одній вершині та проходить через ряд проміжних вершин без повторень [67]. Знак циклу визначається добутком знаків усіх дуг, що входять до нього.

Цикл позитивного зворотного зв'язку (парний цикл) має позитивний добуток знаків дуг, тобто містить парну кількість від'ємних дуг (включаючи нуль). Такі цикли характеризуються властивістю посилення відхилень від початкового стану системи. Ознака парного циклу — відсутність або парна кількість від'ємних дуг [68].

Цикл негативного зворотного зв'язку (непарний цикл) має від'ємний добуток знаків дуг, тобто містить непарну кількість від'ємних дуг. Такі цикли мають властивість пригнічення відхилень та стабілізації системи. Ознака непарного циклу — непарна кількість від'ємних дуг [68].

Формально, для циклу $C = (v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_k}, v_{i_1})$ знак циклу визначається як [65]:

$$\text{sign}(C) = \prod_{j=1}^k \text{sign}(a_{i_j, i_{j+1}}), \quad (2.9)$$

де $a_{i_j, i_{j+1}}$ — елемент матриці суміжності, що відповідає дузі від v_{i_j} до $v_{i_{j+1}}$, а $i_{k+1} = i_1$.

2.4.2 Критерій структурної стійкості

Згідно з критерієм структурної стійкості, система вважається структурно стійкою, якщо кількість стабілізуючих циклів (негативного зворотного зв'язку) перевищує або дорівнює кількості циклів-підсилювачів (позитивного зворотного зв'язку) [68]:

$$N^{(-)} \geq N^{(+)}, \quad (2.10)$$

де $N^{(-)}$ — кількість непарних (стабілізуючих) циклів; $N^{(+)}$ — кількість парних (підсилюючих) циклів.

Переважаання циклів позитивного зворотного зв'язку свідчить про тенденцію системи до нестійкості. У такому випадку навіть незначні відхилення від стану рівноваги будуть наростати, та не мати тенденції до стабілізації [65].

2.4.3 Алгоритм визначення циклів

Для виявлення всіх циклів когнітивної карти застосовується алгоритм пошуку в глибину (DFS — Depth-First Search) з модифікацією для виявлення замкнених шляхів. Алгоритм виконує обхід графа, позначаючи відвідані вершини, та фіксує цикл при поверненні до вже відвіданої вершини.

Обчислювальна складність алгоритму пошуку всіх циклів може бути значною для графів з великою кількістю вершин та дуг, оскільки кількість циклів може зростати нелінійно.

Формальний опис алгоритму пошуку циклів:

1. **Ініціалізація.** Позначити всі вершини як невідвідані. Створити порожній список для зберігання знайдених циклів.
2. **Рекурсивний обхід.** Для кожної вершини v_i графа виконати процедуру пошуку циклів:
 - Позначити поточну вершину як відвідану та додати до поточного шляху.
 - Для кожної суміжної вершини v_j :
 - Якщо v_j є початком шляху — знайдено цикл, зберегти його.
 - Якщо v_j не відвідана — рекурсивно викликати процедуру для v_j .
 - Видалити поточну вершину зі шляху та позначити як невідвідану.
3. **Обчислення знаків циклів.** Для кожного знайденого циклу обчислити добуток знаків дуг та класифікувати як парний або непарний.
4. **Порівняльний аналіз.** Обчислити $N^{(+)}$, $N^{(-)}$ та співвідношення циклів.

Для практичної реалізації алгоритму використовується представлення графа у вигляді списку суміжності, що забезпечує ефективний доступ до сусідніх вершин. Складність алгоритму становить $O(|V| + |E|)$ для одного обходу, де $|V|$ — кількість вершин, $|E|$ — кількість дуг [67].

2.4.4 Алгоритм перевірки структурної стійкості

Процедура визначення структурної стійкості когнітивної карти для її матриці суміжності A_G може бути представлена у вигляді наступної послідовності кроків:

Крок 1. Перетворити матрицю суміжності на знакову: $S_G = \text{sign}(A_G)$.

Крок 2. Застосувати алгоритм пошуку циклів до знакового графа.

Крок 3. Для кожного знайденого циклу:

- Обчислити добуток знаків дуг циклу.
- Якщо добуток > 0 , інкрементувати лічильник $N^{(+)}$.
- Якщо добуток < 0 , інкрементувати лічильник $N^{(-)}$.

Крок 4. Оцінити структурну стійкість:

- Якщо $N^{(-)} \geq N^{(+)}$, система структурно стійка.
- Якщо $N^{(-)} < N^{(+)}$, система структурно нестійка.

Крок 5. Вивести результати: кількість циклів кожного типу, їх співвідношення та висновок про структурну стійкість.

2.5 Чисельна стійкість когнітивної моделі

Чисельна стійкість когнітивної моделі визначає характер динамічної поведінки системи при імпульсному моделюванні. Аналіз чисельної стійкості ґрунтується на дослідженні власних чисел матриці суміжності когнітивної карти та застосуванні критеріїв стійкості Ляпунова [65, 68].

2.5.1 Критерій стійкості за Ляпуновим

Стійкість когнітивної моделі досліджується у двох аспектах: стійкість за початковим значенням та стійкість за збуренням [68].

Стійкість за початковим значенням характеризує поведінку системи при відхиленні початкових умов від рівноважного стану. Система є стійкою за початковим значенням, якщо при малих відхиленнях початкових значень траєкторія системи залишається обмеженою [65].

Стійкість за збуренням характеризує реакцію системи на зовнішні впливи. Система є стійкою за збуренням, якщо після припинення зовнішнього впливу вона повертається до рівноважного стану [68].

Для визначення стійкості застосовується критерій, що ґрунтується на аналізі власних чисел матриці суміжності W зваженого графа [65, 68]:

1. *Стійкість за початковим значенням*: система є стійкою за початковим значенням, якщо спектральний радіус матриці суміжності $\rho(W) < 1$, де

$$\rho(W) = \max_i |\lambda_i|, \quad (2.11)$$

і λ_i — власні числа матриці W .

2. *Стійкість за збуренням*: система є стійкою за збуренням, якщо $\max_i |\lambda_i| \leq 1$.

Система вважається чисельно стійкою, якщо вона є стійкою і за початковим значенням, і за збуренням, тобто якщо $\rho(W) < 1$ [68].

2.5.2 Власні числа матриці суміжності

Власні числа λ матриці суміжності W визначаються як корені характеристичного рівняння [65]:

$$\det(W - \lambda I) = 0, \quad (2.12)$$

де I — одинична матриця розмірності $n \times n$; n — кількість вершин когнітивної карти.

2.5.3 Класифікація типів динамічної поведінки

На основі аналізу власних чисел матриці суміжності можна класифікувати типи динамічної поведінки когнітивної моделі [65, 68]:

Тип 1. Стійка монотонна збіжність. Усі власні числа є дійсними та за модулем меншими за одиницю: $\lambda_i \in \mathbb{R}, |\lambda_i| < 1$. Система монотонно повертається до рівноважного стану після збурення.

Тип 2. Стійка коливальна збіжність. Серед власних чисел є комплексні з модулем меншим за одиницю: $\lambda = a \pm bi, |\lambda| = \sqrt{a^2 + b^2} < 1$. Система повертається до рівноваги через згасаючі коливання. Період коливань визначається аргументом комплексного числа: $T = 2\pi / \arctan(b/a)$.

Тип 3. Гранична стійкість. Максимальний модуль власних чисел дорівнює одиниці: $\rho(W) = 1$. Система перебуває на межі стійкості; її поведінка залежить від структурних особливостей системи.

Тип 4. Нестійка монотонна розбіжність. Є дійсне власне число за модулем більше одиниці: $\exists \lambda_i \in \mathbb{R} : |\lambda_i| > 1$. Значення у вершинах необмежено зростають (або спадають).

Тип 5. Нестійка коливальна розбіжність. Є комплексні власні числа з модулем більшим за одиницю: $|\lambda| > 1$. Система демонструє наростаючі коливання.

2.5.4 Зв'язок структурної та чисельної стійкості

Слід зазначити, що структурна та чисельна стійкість є різними характеристиками когнітивної моделі і можуть не збігатися [68]. Система може бути структурно стійкою (переважання стабілізуючих циклів), але чисельно нестійкою (спектральний радіус більший за одиницю), і навпаки.

На практиці часто виникає ситуація, коли знакова когнітивна карта є структурно стійкою, але після присвоєння вагових коефіцієнтів функціональний граф виявляється чисельно нестійким. Це пов'язано з тим, що великі за абсолютною величиною вагові коефіцієнти можуть призводити до домінування підсилюючих контурів, навіть якщо їх кількість менша за кількість стабілізуючих.

2.6 Процедура приведення когнітивної моделі до стійкого стану

Якщо когнітивна модель виявляється чисельно нестійкою, необхідно виконати процедуру її приведення до стійкого стану. Ця процедура передбачає коригування

вагових коефіцієнтів зв'язків когнітивної карти таким чином, щоб спектральний радіус матриці суміжності став меншим за одиницю [68].

2.6.1 Класичні підходи до приведення моделі до стійкості

В літературі описано кілька підходів до приведення когнітивної моделі до чисельної стійкості [68].

Пропорційне масштабування ваг. Найпростіший підхід полягає в одночасному зменшенні всіх вагових коефіцієнтів у певну кількість разів:

$$W' = \alpha W, \quad \text{де } 0 < \alpha < 1. \quad (2.13)$$

Оскільки власні числа матриці W' дорівнюють $\alpha \lambda_i$, де λ_i — власні числа матриці W , для досягнення стійкості достатньо вибрати $\alpha < 1/\rho(W)$. З теореми Гершгоріна [79] випливає, що коефіцієнт α можна обрати з умови $\alpha < 1/\max_i \sum_{j \neq i} |w_{ij}|$.

Недоліком цього підходу є рівномірне зменшення всіх ваг без урахування їх відносної важливості. При цьому втрачається інформація про оцінки, отримані на етапі передбачення, оскільки співвідношення між вагами штучно змінюються пропорційно, що не відповідає реальній структурі впливів у системі.

Селективне коригування ваг. Більш обґрунтованим вважається підхід, що передбачає селективне коригування окремих вагових коефіцієнтів на основі аналізу їх впливу на власні числа матриці. Цей підхід дозволяє зберегти важливі сильні зв'язки та скоригувати лише ті, що найбільше впливають на нестійкість [68].

Однак селективне коригування також має суттєвий недолік: при виборі зв'язків для коригування втрачається обґрунтованість оригінальних вагових коефіцієнтів, отриманих методами якісного аналізу (STEER, Delphi, морфологічний аналіз). Крім того, локальне коригування окремих ваг може порушити баланс впливів у системі та призвести до неочікуваної зміни динамічної поведінки моделі.

Експертне коригування. Коригування вагових коефіцієнтів може здійснюватися на основі додаткових експертних оцінок. Експерти переглядають оцінки сили

зв'язків з урахуванням виявленої нестійкості та пропонують більш консервативні значення [68]. Цей підхід забезпечує змістовну обґрунтованість змін, однак є трудомістким та суб'єктивним.

2.6.2 Оптимізаційний алгоритм приведення до чисельної стійкості

Для подолання недоліків класичних підходів у роботі [62] запропоновано оптимізаційний алгоритм приведення когнітивної моделі до чисельної стійкості, що враховує структурні особливості та максимально зберігає оригінальні вагові коефіцієнти.

Нехай $\hat{A} \in M_{n \times n}([-1; 1])$ — початкова матриця суміжності когнітивної карти з елементами $\hat{a}_{ij}$. Задача полягає у знаходженні матриці $A \in M_{n \times n}([-1; 1])$ з елементами a_{ij} такої, що $\rho(A) < 1$.

Визначимо множину допустимих розв'язків $S_{\hat{A}} \subset M_{n \times n}([-1; 1])$ як множину матриць, що задовольняють наступним обмеженням:

$$\forall A \in S_{\hat{A}} : \quad \hat{a}_{ij} = 0 \Rightarrow a_{ij} = 0, \quad \hat{a}_{ij} \neq 0 \Rightarrow a_{ij} \cdot \hat{a}_{ij} > 0. \quad (2.14)$$

Ці обмеження гарантують, що: (1) нульові елементи початкової матриці залишаються нульовими (збереження структури графа); (2) знаки елементів не змінюються (збереження напрямку впливів).

Для врахування динамічних властивостей моделі введемо дві множини пар індексів $C^+, C^- \subset \{1, \dots, n\}^2$. Належність пари (i, j) до множини C^+ означає, що збільшення значення у вершині V_i на кроці моделювання k призводить до збільшення значення у вершині V_j на всіх наступних кроках. Аналогічно, $(i, j) \in C^-$ означає зменшення значення у V_j . При цьому $C^+ \cap C^- = \emptyset$.

Визначимо функцію $w(A, i, j, k)$, що оцінює відповідність поведінки моделі очікуваним причинно-наслідковим зв'язкам:

$$w(A, i, j, k) = \begin{cases} 1, & x_{k_j} - x_{(k-1)_j} \leq 0, & (i, j) \in C^+ \\ 1, & x_{k_j} - x_{(k-1)_j} \geq 0, & (i, j) \in C^- \\ 0, & x_{k_j} - x_{(k-1)_j} > 0, & (i, j) \in C^+ \\ 0, & x_{k_j} - x_{(k-1)_j} < 0, & (i, j) \in C^- \end{cases} \quad (2.15)$$

де $\vec{x}_k$ — вектор значень вершин на кроці k , при цьому $\vec{x}_0 = \vec{0}$, $\vec{x}_1 = (0, \dots, 1, \dots, 0)$ (одиниця у позиції i), $\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + (\vec{x}_k - \vec{x}_{k-1})A$.

Нехай $N > 2$ — кількість кроків моделювання. Визначимо нормалізовану функцію відповідності динамічній поведінці:

$$m(A, N) = \frac{\sum_{(i,j) \in C^+ \cup C^-} \sum_{k=2}^N w(A, i, j, k)}{(N-1)|C^+ \cup C^-|} \in [0, 1]. \quad (2.16)$$

Для оцінки спектрального радіуса визначимо функцію:

$$s(A) = \begin{cases} 0, & \rho(A) < 1 \\ \frac{\rho(A)}{\max_i \sum_j \psi(a_{ij})}, & \rho(A) \geq 1 \end{cases} \quad (2.17)$$

де $\psi(a_{ij}) = 1$ при $a_{ij} \neq 0$ та $\psi(a_{ij}) = 0$ інакше. З теореми Гершгоріна випливає, що $s(A) \in [0, 1]$.

Для оцінки відхилення від початкової матриці визначимо функцію:

$$d(A, \hat{A}) = \frac{\|A - \hat{A}\|}{\max_{\tilde{A} \in S_{\hat{A}}} \|\tilde{A} - \hat{A}\|} \in [0, 1], \quad (2.18)$$

де при використанні евклідової норми знаменник дорівнює $\sqrt{\sum_{\hat{a}_{ij} \neq 0} (\max(|\hat{a}_{ij}|, 1 - |\hat{a}_{ij}|))^2}$.

Цільова функція оптимізації формується як зважена сума трьох компонент:

$$F(A, \alpha, \beta, \gamma) = \alpha \cdot d(A, \hat{A}) + \beta \cdot s(A) + \gamma \cdot m(A, N), \quad (2.19)$$

де $\alpha, \gamma \in [0, 1]$, $\beta \in \mathbb{R}^+$ — вагові коефіцієнти.

Задача приведення до чисельної стійкості зводиться до задачі умовної оптимізації:

$$\begin{cases} F(A, \alpha, \beta, \gamma) \rightarrow \min \\ A \in S_{\hat{A}} \end{cases} \quad (2.20)$$

2.6.3 Процедура розв'язання оптимізаційної задачі

Вагові коефіцієнти α та γ задаються дослідником відповідно до пріоритетів: збільшення α підвищує важливість збереження оригінальних ваг з морфологічного аналізу; збільшення γ підвищує важливість відповідності динамічній поведінці. Для знаходження $\beta > 0$, що забезпечує $\rho(A) < 1$, застосовується метод бісекції [62]:

Крок 1. Визначити інтервал пошуку $[h_a; h_b]$, де $h_a = 0$, а $h_b > 0$ таке, що при $\beta = h_b$ розв'язок задачі (2.20) дає $\rho(A) < 1$.

Крок 2. Задати точність пошуку $\varepsilon > 0$.

Крок 3. Розв'язати задачу (2.20) для $\beta = (h_a + h_b)/2$.

Крок 4. Якщо $h_b - h_a < \varepsilon$, завершити пошук.

Крок 5. Якщо $\rho(A) < 1$, покласти $h_b = (h_a + h_b)/2$ та повернутися до кроку 3.

Крок 6. Якщо $\rho(A) \geq 1$, покласти $h_a = (h_a + h_b)/2$ та повернутися до кроку 3.

2.6.4 Порівняльний аналіз підходів

У табл. 2.1 наведено порівняльну характеристику розглянутих підходів до приведення когнітивної моделі до чисельної стійкості.

Як видно з табл. 2.1, оптимізаційний алгоритм та експертне коригування забезпечують максимальну надійність когнітивної моделі, оскільки зберігають обґрунтованість вагових коефіцієнтів, отриманих на етапі якісного аналізу. Оптимізаційний алгоритм має перевагу в можливості автоматизації та врахуванні динамічних властивостей моделі через функцію $m(A, N)$.

Таблиця 2.1 – Порівняння підходів приведення когнітивної моделі до стійкості

Критерій	Пропорц. масштаб.	Селект. коригув.	Експерт. коригув.	Оптиміз. алгоритм
Збереження структури графа	+	+	+	+
Збереження знаків зв'язків	+	+	+	+
Збереження оцінок форсайту	–	±	+	+
Врахування динаміки	–	–	±	+
Мінімізація відхилень	–	±	±	+
Автоматизація	+	+	–	+
Обчисл. складність	Низька	Середня	–	Висока

Рекомендується комбінований підхід: спочатку застосувати оптимізаційний алгоритм для автоматичного приведення до стійкості, а потім провести експертну верифікацію отриманих результатів [62].

2.7 Імпульсне когнітивне моделювання та сценарний аналіз

Імпульсне когнітивне моделювання є методом дослідження динамічної поведінки системи, представлені когнітивною моделлю, під впливом зовнішніх або внутрішніх збурень [64, 68]. Цей метод дозволяє моделювати розповсюдження збурень по структурі когнітивної карти та оцінювати наслідки різних управлінських рішень.

2.7.1 Модель імпульсного процесу

Модель імпульсного процесу описує еволюцію значень у вершинах когнітивної карти у дискретному часі [65, 68]:

$$x_{v_i}(n+1) = x_{v_i}(n) + \sum_{j=1}^k f(x_i, x_j, e_{ij})P_j(n) + Q_{v_i}(n), \quad (2.21)$$

де $x_{v_i}(n)$, $x_{v_i}(n+1)$ — значення показника у вершині v_i в моменти часу $t = n$ та $t = n+1$ відповідно; $P_j(n)$ — імпульс (зміна значення), що був у вершині v_j в момент $t = n$; $f(x_i, x_j, e_{ij})$ — функція впливу, що визначається ваговим коефіцієнтом дуги e_{ij} ; $Q_{v_i}(n) = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}$ — вектор зовнішніх імпульсів (збурюючих або керуючих впливів), внесених у вершину v_i в момент часу n [64].

Матричне представлення моделі імпульсного процесу має вигляд [68]. Нехай Q — вектор-рядок початкового збурення, W — матриця суміжності зваженого графа, де w_{ij} — вага впливу від вершини v_i на вершину v_j . Тоді вектор імпульсів (приростів значень) на кроці n визначається як:

$$P_n = Q \cdot W^{n-1}, \quad (2.22)$$

а вектор значень у вершинах:

$$X_n = X_{n-1} + P_n = \sum_{k=1}^n Q \cdot W^{k-1}, \quad (2.23)$$

де $X_0 = 0$ — початковий стан системи. Для стовпцевого представлення векторів формули набувають вигляду $p_n = (W^T)^{n-1}q$ та $x_n = x_{n-1} + p_n$, де q — вектор-стовпець збурення.

2.7.2 Сценарний аналіз

Когнітивне моделювання базується на сценарному підході, де сценарій розуміється як сукупність [64, 68]:

- тенденцій, що характеризують ситуацію в даний момент;
- бажаних цілей розвитку системи;
- комплексу заходів (керуючих впливів), що впливають на розвиток ситуації;

- системи спостереження за параметрами, що контролюють характеристики ситуації.

Сценарії формуються шляхом задання початкових умов (значень у вершинах), послідовності зовнішніх впливів та горизонту моделювання. Результатом є траєкторії зміни значень у всіх вершинах когнітивної карти [65].

2.7.3 Аналіз результатів моделювання

Результати імпульсного моделювання аналізуються за кількома напрямками [64]:

Характер динаміки. Визначається тип поведінки системи: монотонна збіжність до рівноваги, коливальна збіжність, незгасаючі коливання, або необмежене зростання. Характер динаміки визначається власними числами матриці суміжності, структурними особливостями та початковими збуреннями.

Час перехідного процесу. Оцінюється час, необхідний для досягнення нового стаціонарного стану або затухання коливань [68].

Чутливість до збурень. Аналізується, які вершини найбільш чутливі до зовнішніх впливів і як збурення в різних вершинах впливають на стан системи в цілому.

Ефективність управління. Для сценаріїв з керуючими впливами оцінюється ефективність досягнення цільових показників та витрати ресурсів на управління [64].

2.7.4 Приклад імпульсного моделювання

Розглянемо приклад імпульсного моделювання для когнітивної карти з чотирма вершинами, що описує систему факторів підземного будівництва [61]:

- v_1 — геологічна складність ділянки;
- v_2 — технологічні ризики;
- v_3 — вартість будівництва;
- v_4 — інвестиційна привабливість.

Матриця суміжності зваженого графа:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 0.6 & 0.4 & -0.3 \\ 0 & 0 & 0.5 & -0.4 \\ 0 & 0 & 0 & -0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Спектральний радіус даної матриці $\rho(W) = 0$ (всі власні числа дорівнюють нулю), оскільки матриця є нільпотентною. Модель є чисельно стійкою.

Сценарій 1: Одноразове збурення в v_1 . Нехай вектор збурення $Q = (1, 0, 0, 0)$, тобто одиничне збурення вноситься у вершину v_1 (геологічна складність). Початковий стан $X_0 = (0, 0, 0, 0)$. Результати моделювання на 5 кроків наведено у таблиці 2.2:

Таблиця 2.2 – Приклад розрахунку результатів імпульсного когнітивного моделювання

n	x_1	x_2	x_3	x_4
0	0	0	0	0
1	1.0	0	0	0
2	1.0	0.6	0.4	-0.3
3	1.0	0.6	0.7	-0.82
4	1.0	0.6	0.7	-1.03
5	1.0	0.6	0.7	-1.03

Інтерпретація: збільшення геологічної складності (v_1) призводить до зростання технологічних ризиків (v_2) та вартості будівництва (v_3), що негативно впливає на інвестиційну привабливість (v_4). Система стабілізується на 4-му кроці.

2.7.5 Стаціонарний стан та збіжність

Система досягає стаціонарного стану, коли вектор імпульсів $P_n = Q \cdot W^{n-1} = 0$, тобто значення у всіх вершинах перестають змінюватися [68]. Це відбувається, коли $W^{n-1} \rightarrow 0$.

Для нільпотентної матриці (коли всі власні числа дорівнюють нулю) існує таке k , що $W^k = 0$, і система досягає стаціонарного стану за скінченну кількість кроків. Для матриці зі спектральним радіусом $\rho(W) < 1$ матриця $W^n \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, що забезпечує асимптотичну збіжність до стаціонарного стану [65].

2.8 Висновки до розділу 2

У даному розділі розглянуто теоретичні та методологічні основи когнітивного моделювання складних систем, зокрема систем планування підземної інфраструктури.

Основні результати розділу:

1. Обґрунтовано застосування двоетапного підходу до когнітивного моделювання, що включає процес передбачення для отримання достовірних вихідних даних та власне когнітивне моделювання для аналізу властивостей системи.
2. Наведено формальне визначення когнітивної карти як знаково-орієнтованого графа $G = \langle V, E \rangle$ та функціонального графа $\Phi = \langle G, X, F(X, E), \Theta \rangle$ як його розширення для врахування сили зв'язків. Розглянуто ієрархічну когнітивну карту для моделювання багаторівневих систем.
3. Визначено етапи розробки когнітивної моделі: побудова когнітивної карти, обґрунтування структурної стійкості, обґрунтування чисельної стійкості, симпліціальний аналіз та аналіз модулярності.
4. Розглянуто методи аналізу структурної стійкості когнітивної карти на основі дослідження циклів позитивного та негативного зворотного зв'язку.
5. Наведено методи аналізу чисельної стійкості когнітивної моделі на основі критерію Ляпунова. Розглянуто зв'язок власних чисел матриці з характером динамічної поведінки системи.

6. Описано процедуру приведення когнітивної моделі до стійкого стану шляхом коригування вагових коефіцієнтів зв'язків. Наведено алгоритм для приведення когнітивної карти до чисельно стійкого виду.
7. Розглянуто модель імпульсного процесу для когнітивного моделювання та методологію сценарного аналізу.

Результати даного розділу становлять теоретичну основу для практичного застосування когнітивного моделювання до задач планування підземної інфраструктури, що буде продемонстровано у наступних розділах даної роботи.

3 СИМПЛІЦІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА АНАЛІЗ СПІЛЬНОТ КОГНІТИВНИХ МОДЕЛЕЙ

Дослідження структурних властивостей когнітивних моделей є критично важливим етапом когнітивного моделювання, що дозволяє оцінити цілісність системи, виявити її топологічні особливості та обґрунтувати достовірність побудованої моделі [64, 68]. У цьому розділі розглядаються два взаємодоповнюючих підходи до аналізу структури когнітивних карт: симпліціальний (поліедральний) аналіз, що дозволяє дослідити багатовимірну геометрію зв'язків у системі, та аналіз спільнот на основі методів максимізації модулярності, що забезпечує виявлення природних угруповань факторів [80, 83].

Симпліціальний аналіз, розроблений у 1970-х роках, надає математичний апарат для дослідження структурних властивостей складних систем, що виходить за межі традиційного графового аналізу [80, 81]. На відміну від класичної теорії графів, яка розглядає лише бінарні відношення між парами елементів, симпліціальний аналіз дозволяє досліджувати багатовимірні зв'язки та оцінювати різні рівні зв'язності структури [82].

Аналіз спільнот (community detection) є сучасним напрямком мережевого аналізу, що активно розвивається з початку 2000-х років [89, 90]. Методи виявлення спільнот дозволяють ідентифікувати групи вершин графа, які мають більш щільні внутрішні зв'язки порівняно із зовнішніми. У контексті когнітивного моделювання це забезпечує виявлення функціональних підсистем досліджуваної системи та обґрунтування вагових характеристик зв'язків.

Інтеграція симпліціального аналізу та аналізу спільнот у методологію когнітивного моделювання дозволяє:

- оцінити цілісність та зв'язність когнітивної моделі;
- виявити ключові структурні елементи системи;
- обґрунтувати кількісні характеристики зв'язків на основі належності до спільнот;

- забезпечити гарантоване приведення моделі до структурної стійкості;
- підвищити інтерпретованість результатів моделювання.

3.1 Теоретичні основи симпліціального аналізу

Симпліціальний аналіз (q -аналіз) є методом алгебраїчної топології, що застосовується для дослідження структурних властивостей складних систем [80]. Метод базується на представленні системи у вигляді симпліціального комплексу — геометричного об'єкта, що узагальнює поняття графа на багатовимірний випадок.

3.1.1 Історія розвитку методу

Топологічні дослідження складних систем на основі вивчення їх структурних властивостей були розпочаті в 1960–1970-х роках. Перший інструмент симпліціального аналізу, названий q -аналізом, був розроблений на математичних основах, закладених раніше, та отримав розвиток у роботах [80, 81].

У фундаментальній роботі “Mathematical Structure in Human Affairs” (1974) [80] запропоновано використовувати методи алгебраїчної топології для аналізу соціальних, економічних та організаційних систем. Подальший розвиток методу представлено в монографії “Combinatorial Connectivities in Social Systems” (1977), де розроблено формальний апарат q -зв'язності [81].

У монографії “Connectivity, Complexity, and Catastrophe in Large-Scale Systems” (1979) [82] систематизовано застосування симпліціального аналізу до дослідження великих систем та показано зв'язок з теорією катастроф. Ці роботи заклали основу для використання топологічних методів у системному аналізі.

У сучасних дослідженнях симпліціальний аналіз застосовується для вивчення соціальних мереж [89], біологічних систем, економічних структур та когнітивних моделей [65, 68]. Особливого значення метод набув у контексті аналізу складності систем та виявлення їх топологічних інваріантів.

3.1.2 Базові поняття та визначення

У симпліціальному аналізі система розглядається у вигляді відношення між елементами двох множин: множини вершин V та заданого сімейства непорожніх підмножин цих вершин — симплексів [80].

Симплекс розмірності p (або p -симплекс) — це впорядкована множина з $p + 1$ афінно незалежних точок:

$$\sigma^p = \langle v_0, v_1, \dots, v_p \rangle. \quad (3.1)$$

Геометрично симплекс можна інтерпретувати наступним чином [82]:

- 0-симплекс — точка (вершина);
- 1-симплекс — відрізок (ребро);
- 2-симплекс — трикутник;
- 3-симплекс — тетраедр;
- p -симплекс — p -вимірний аналог тетраедра.

Грань симплекса — це симплекс, утворений підмножиною його вершин. Кожен p -симплекс має $\binom{p+1}{k+1}$ граней розмірності k для $0 \leq k \leq p$ [81].

Симпліціальний комплекс K — це скінченна множина симплексів, що задовольняє наступним умовам [80]:

1. Будь-яка грань симплекса з K також належить K .
2. Перетин будь-яких двох симплексів з K є або порожньою множиною, або спільною гранню обох симплексів.

Формально симпліціальний комплекс визначається як пара $K = (V, \Sigma)$, де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ — множина вершин, $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m\}$ — множина симплексів, причому кожен симплекс $\sigma_i \subseteq V$ [82].

Розмірність комплексу $\dim(K)$ визначається як максимальна розмірність симплексів, що входять до нього:

$$\dim(K) = \max_{\sigma \in K} \dim(\sigma). \quad (3.2)$$

3.1.3 Побудова симпліціальних комплексів для когнітивних карт

Для обґрунтування структурної цілісності когнітивної карти застосовується симпліціальний аналіз. Основою симпліціального аналізу в когнітивному моделюванні є розгляд зваженого орієнтованого графа (функціонального графа) $\Phi = \langle G, X, F(X, E), \Theta \rangle$ через побудову двох симпліціальних комплексів, що відображають дуальні перспективи системи [80].

Нехай когнітивна карта задана графом $G = (V, E)$, де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ — множина вершин (факторів), $E \subseteq V \times V$ — множина ребер (зв'язків). Введемо дві множини вершин симпліціального комплексу:

$$V_X = \{x_i \mid e_{ij} \in E\}, \quad V_Y = \{x_j \mid e_{ij} \in E\}, \quad (3.3)$$

де V_X — множина вершин, від яких виходять ребра, а V_Y — множина вершин, до яких входять ребра.

Примальний комплекс $K_{V_Y}(V_X, \Phi)$ утворюється шляхом розгляду кожного елемента $x_j \in V_Y$, який визначає симплекс σ_j^y , вершинами якого є ті $x_i \in V_X$, для яких $e_{ij} \in E$ [81]:

$$\sigma_j^y = \{x_i \in V_X \mid e_{ij} \in E\}. \quad (3.4)$$

Дуальний комплекс $K_{V_X}(V_Y, \Phi)$ отримують транспонуванням відношення. Кожен елемент $x_i \in V_X$ визначає симплекс σ_i^x , вершинами якого є ті $x_j \in V_Y$, для яких $e_{ij} \in E$ [82]:

$$\sigma_i^x = \{x_j \in V_Y \mid e_{ij} \in E\}. \quad (3.5)$$

Примальний та дуальний комплекси надають два взаємодоповнюючих погляди на структуру системи. Примальний комплекс відображає, які фактори впливають на кожен конкретний фактор системи. Дуальний комплекс показує, на які фактори впливає кожен конкретний фактор. Ця двоїстість дозволяє аналізувати як входи, так і виходи кожного елемента когнітивної карти.

3.1.4 Характеристики q-зв'язності

Ключовим поняттям симпліціального аналізу є q-зв'язність, яка узагальнює класичне поняття зв'язності графів на багатовимірний випадок [80].

Для заданої вершини графа x розмірність відповідного йому симплекса позначають через $\hat{q}(x)$ та називають *опорною розмірністю елемента*:

$$\hat{q}(x) = \dim(\sigma^x) = |\sigma^x| - 1. \quad (3.6)$$

Ця величина відображає локальне вкладення вершини у реляційну структуру, незалежно від її глобальної зв'язності. Симплекс, побудований вершиною x з розмірністю k , позначається як σ_k^x [81].

Два симплекси σ_1 та σ_2 називають *q-близькими* або *зв'язаними на рівні q*, якщо їх перетин містить принаймні q-вимірний симплекс, тобто:

$$|\sigma_1 \cap \sigma_2| \geq q + 1. \quad (3.7)$$

Транзитивне замикання q-близькості розбиває множину симплексів на *q-зв'язні класи*, що позначаються C_q . Елементи одного q-зв'язного класу можна з'єднати ланцюжком q-близьких симплексів [82].

Для кожної вершини графа x визначається значення:

$$\tilde{q}(x) = \max\{q : x \in C_q\}, \quad (3.8)$$

тобто найвищий рівень q , на якому симплекс σ^x бере участь у глобальній структурі. За означенням, $-1 \leq \tilde{q}(x) \leq \hat{q}(x)$ [81].

Випадок $\tilde{q}(x) = -1$ відповідає вершині графа x , якщо його симплекс σ^x не зв'язаний з іншими симплексами на жодному q-рівні, що свідчить про ізолюваність елемента в структурі системи.

3.1.5 Ексцентриситет як характеристика інтегрованості

Ексцентриситет вершини x вимірює різницю між опорною розмірністю $\hat{q}(x)$ та найвищим досягнутим рівнем зв'язності $\tilde{q}(x)$, та характеризує, наскільки сильно

елемент інтегрований в систему [80]:

$$ecc(x) = \begin{cases} \frac{\hat{q}(x) - \tilde{q}(x)}{\tilde{q}(x) + 1}, & \tilde{q}(x) \geq 0, \\ \infty, & \tilde{q}(x) = -1. \end{cases} \quad (3.9)$$

Інтерпретація значень ексцентриситету [82]:

- $ecc(x) = 0$ — елемент повністю інтегрований у структуру системи, його локальна розмірність відповідає глобальній зв'язності;
- $0 < ecc(x)$ — елемент частково інтегрований, існує певний розрив між локальною та глобальною структурами;
- $ecc(x) = \infty$ — елемент повністю ізольований від решти системи.

Якщо $ecc(x) = \infty$, це явно позначає повну ізоляцію елемента в системі. Такі елементи потребують особливої уваги при верифікації когнітивної моделі, оскільки їх наявність може свідчити про неповноту або помилки в побудові когнітивної карти [82].

3.1.6 Процедура симпліціального аналізу когнітивних карт

Застосування симпліціального аналізу до когнітивних карт реалізується за наступною процедурою [81]:

1. *Побудова матриці інцидентності.* На основі когнітивної карти формується матриця інцидентності $\Lambda = (\lambda_{ij})$, де $\lambda_{ij} = 1$, якщо існує зв'язок від вершини i до вершини j , та $\lambda_{ij} = 0$ інакше.
2. *Формування симпліціальних комплексів.* За матрицею інцидентності будуються примальний та дуальний симпліціальні комплекси.
3. *Обчислення опорних розмірностей.* Для кожної вершини x обчислюється $\hat{q}(x) = |\sigma^x| - 1$.
4. *Визначення q-зв'язних класів.* Для кожного рівня $q = 0, 1, \dots, \max_x \hat{q}(x)$ визначаються класи q-зв'язних симплексів.
5. *Обчислення глобальної зв'язності.* Для кожної вершини визначається $\tilde{q}(x)$.
6. *Розрахунок ексцентриситетів.* Обчислюються значення $ecc(x)$ для всіх вершин.

7. *Аналіз результатів.* Виявляються ізольовані елементи ($ecc(x) = \infty$), формулюються рекомендації щодо корекції моделі.

3.2 Теоретичні основи аналізу спільнот

Аналіз спільнот (community detection) є напрямком мережевого аналізу, що займається виявленням груп вершин у графах, які характеризуються більш щільними внутрішніми зв'язками порівняно із зовнішніми [83,90]. У контексті когнітивного моделювання методи виявлення спільнот дозволяють ідентифікувати функціональні підсистеми та обґрунтувати кількісні характеристики зв'язків у моделі.

3.2.1 Визначення спільноти та характеристики щільності

Спільнота — це підмножина вершин когнітивної карти, внутрішня щільність якої перевищує її зовнішню щільність [89]. Формально, для спільноти $c \subseteq V$ визначаються наступні характеристики.

Внутрішня щільність ρ_{in} спільноти c визначається як відношення суми ваг наявних в спільноті ребер до максимально можливої суми ваг в спільноті [83]:

$$\rho_{in}(c) = \frac{2W_{in}(c)}{|V(c)|(|V(c)| - 1)} \in [0, 1], \quad (3.10)$$

де $W_{in}(c)$ — сума ваг на всіх ребрах усередині спільноти c , а $|V(c)|$ — кількість вершин у цій спільноті.

Зовнішня щільність ρ_{out} спільноти c визначається як:

$$\rho_{out}(c) = \frac{W_{out}(c)}{|V(c)||V \setminus V(c)|} \in [0, 1], \quad (3.11)$$

де $W_{out}(c)$ — сума ваг ребер між вершинами спільноти c та вершинами поза нею, а $|V \setminus V(c)|$ — кількість вершин графа, що не належить спільноті [89].

При аналізі когнітивних карт від'ємні значення ваг беруться за модулем, оскільки для структурної кластеризації на спільноти важливе значення зв'язку, а не його знак. Такий підхід дозволяє виявити групи факторів із інтенсивними внутрішніми зв'язками, що формують функціональні підсистеми когнітивної моделі складної системи.

Якісна спільнота характеризується високою внутрішньою щільністю $\rho_{in}(c) \rightarrow 1$ та низькою зовнішньою щільністю $\rho_{out}(c) \rightarrow 0$. Відношення цих величин може використовуватися як критерій якості виявленої спільноти.

3.2.2 Модулярність як міра якості розбиття

Для пошуку спільнот з високою щільністю у когнітивній карті одним з підходів було використано методи максимізації модулярності [83].

Модулярність — одна з мір структури мереж або графів, що була розроблена для вимірювання сили розбиття графів на модулі (звані групами, кластерами або спільнотами). Графи з високою модулярністю мають щільні зв'язки між вузлами всередині модулів, але слабкіші зв'язки між вузлами в різних модулях [83, 90].

Модулярність визначається як:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j), \quad (3.12)$$

де:

- A_{ij} позначає елемент матриці суміжності між вершинами i та j , тобто вагу на ребрі між вершинами i та j ;
- $k_i = \sum_j A_{ij}$ — сила вершини (сума ваг її ребер);
- $m = \frac{1}{2} \sum_{ij} A_{ij}$ — загальна вага графа;
- $\delta(c_i, c_j)$ — дельта Кронекера, що дорівнює 1, якщо $c_i = c_j$ (вершини i та j належать одній спільноті), і 0 в іншому разі [83].

Задача максимізації модулярності полягає в $Q \rightarrow \max$. Значення Q при аналізі когнітивних карт лежить у діапазоні $[-0.5, 1]$. Додатні значення вказують на наявність структури спільнот: чим ближче Q до 1, тим виразніше граф розпадається на щільно пов'язані групи. Значення $Q > 0.3$ зазвичай свідчить про значущу модулярну структуру [83].

3.3 Алгоритми виявлення спільнот

Задача виявлення спільнот у мережах є NP-складною, що обумовлює необхідність застосування наближених та евристичних алгоритмів [89]. У цьому підрозділі роз-

глядаються основні алгоритми виявлення спільнот, що можуть бути застосовані до аналізу когнітивних карт.

3.3.1 Алгоритм Greedy Modularity

Алгоритм Greedy Modularity (жадібна максимізація модулярності) запропоновано у 2004 році [84]. Це ієрархічний агломеративний алгоритм, який послідовно об'єднує спільноти з метою максимізації приросту модулярності.

Алгоритм складається з наступних кроків:

1. *Початковий стан*: кожна вершина v_k є окремою спільнотою, тобто $C_k = \{v_k\}$.
2. *Обчислення приросту модулярності*. На кожному кроці обчислюється приріст модулярності при об'єднанні спільнот C_i та C_j :

$$\Delta Q_{ij} = \frac{e_{ij}}{2m} - \frac{K_i K_j}{(2m)^2}, \quad (3.13)$$

де $e_{ij} = \sum_{v_k \in C_i, v_l \in C_j} A_{kl}$ — сума ваг ребер між спільнотами, $K_i = 2W_{in}(C_i) + W_{out}(C_i)$, $K_j = 2W_{in}(C_j) + W_{out}(C_j)$ — суми ваг на всіх ребрах кожної вершини спільноти [84].

3. *Об'єднання*. В одну спільноту об'єднується пара (C_i, C_j) , що дає максимальне ΔQ_{ij} .
4. *Повторення*. Кроки 2–3 повторюються до неможливості покращення (коли всі $\Delta Q_{ij} \leq 0$).

Обчислювальна складність алгоритму становить $O(md \log n)$, де m — кількість ребер, d — глибина дендрограми, n — кількість вершин. Для розріджених графів, типових для когнітивних карт, це забезпечує ефективну роботу [84].

3.3.2 Алгоритм Walktrap

Алгоритм Walktrap (Pons, Latapy, 2005) — метод на основі випадкових блукань [85]. Базова ідея полягає в тому, що випадкове блукання по графу має тенденцію “застрягати” у підграфах з високою внутрішньою щільністю ρ_{in} , оскільки звідти складніше (менш вірогідно) вийти — це і є спільноти.

Ймовірність потрапити з вершини i до вершини j за 1 крок визначається як:

$$P_{ij} = \mathbb{P}(X_{k+1} = j | X_k = i) = \frac{A_{ij}}{k_i}, \quad (3.14)$$

де A_{ij} — елемент матриці суміжності, k_i — степінь вершини i [85].

Ймовірність потрапити з вершини i до вершини j за t кроків визначається як:

$$P_{ij}^t = \mathbb{P}(X_{k+t} = j | X_0 = i). \quad (3.15)$$

Для фіксованого t та кожної вершини i обчислюється розподіл ймовірностей P_i^t досягнення інших вершин за t кроків. Відстань між вершинами визначається як різниця їхніх розподілів [85]:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{r=1}^n \frac{(P_{ir}^t - P_{jr}^t)^2}{k_r}}. \quad (3.16)$$

На кожному кроці в спільноті об'єднуються вершини i, j з мінімальною відстанню d_{ij} . Алгоритм будує ієрархічну структуру (дендрограму), з якої обирається розбиття з максимальною модулярністю.

Обчислювальна складність алгоритму становить $O(mn^2)$ у загальному випадку та $O(n^2 \log n)$ для розріджених графів [85].

3.3.3 Алгоритм Louvain

Алгоритм Louvain (2008) — ітеративний двофазний метод максимізації модулярності, який демонструє високу ефективність на великих мережах [86].

Фаза 1 (локальне переміщення): Кожна вершина v_k спочатку є окремою спільнотою, тобто $C_k = \{v_k\}$. Для кожної вершини i з її спільноти C обчислюється приріст модулярності ΔQ при переміщенні до сусідньої спільноти D :

$$\Delta Q = \frac{1}{2m} \left[k_{i,in}(D) - k_{i,in}(C) - \frac{k_i}{2m} (K_D - K_C) \right], \quad (3.17)$$

де $k_{i,in}(C) = \sum_{j \in C} A_{ij}$, $k_{i,in}(D) = \sum_{j \in D} A_{ij}$ — суми ваг ребер від вершини i до вершин спільнот C та D відповідно, K_C та K_D — загальні суми ваг ребер вершин спільнот [86].

Вершина переміщується до тієї спільноти, яка дає максимальний приріст $\Delta Q > 0$. Процес повторюється до збіжності.

Фаза 2 (агрегація): Граф агрегується — спільноти стають новими вершинами, ваги ребер сумуються. Алгоритм повторюється з фази 1 на агрегованому графі.

Алгоритм завершується, коли досягнуто локальний максимум модулярності. Обчислювальна складність становить $O(n \log n)$, що робить алгоритм одним з найшвидших методів виявлення спільнот [86].

3.3.4 Алгоритм Leiden

Алгоритм Leiden (2019) — вдосконалення Louvain з трифазною структурою, що гарантує виявлення добре зв'язних спільнот [87]. Основною проблемою алгоритму Louvain є можливість утворення погано зв'язних або навіть незв'язних спільнот. Алгоритм Leiden вирішує цю проблему шляхом додавання фази рефайнменту.

Фаза 1 (локальне переміщення): Аналогічно до Louvain — вершини переміщуються до сусідніх спільнот з максимальним $\Delta Q > 0$.

Фаза 2 (рефайнмент): Кожна спільнота розглядається окремо як окремий підграф, на якому відбувається пошук спільнот. Всі вершини v_k спільноти C_i формують нові спільноти C_{i_k} з однієї вершини $C_{i_k} = \{v_k\}$. Приріст ΔQ при переміщенні вершин між спільнотами C_{i_j} рахується відповідно до глобальної структури [87].

Фаза 3 (агрегація): Граф агрегується з урахуванням попередньої фази, аналогічно до методу Louvain, алгоритм повторюється.

Алгоритм Leiden гарантує, що всі виявлені спільноти є зв'язними підграфами, що є важливою властивістю для аналізу когнітивних карт [87].

3.3.5 Алгоритм Leiden CPM

Алгоритм Leiden CPM (Constant Potts Model) використовує ту саму ітеративну схему, що й Leiden з модулярністю, але максимізує іншу цільову функцію H [87]:

$$H = \sum_c \left(W_{in}(c) - \gamma \frac{|V(c)|(|V(c)| - 1)}{2} \right), \quad (3.18)$$

де $W_{in}(c)$ — сума ваг внутрішніх ребер спільноти c , $|V(c)|$ — кількість вершин у спільноті, γ — параметр роздільної здатності.

Цільова функція H у CPM не залежить від глобальних характеристик графа, що усуває обмеження роздільної здатності (що мають методи максимізації модулярності) та дозволяє виявляти малі, але щільні спільноти незалежно від розміру графа. Параметр γ визначає мінімальну внутрішню щільність ρ_{in} , за якої спільнота дає приріст H , оскільки спільнота c вносить додатне значення в H , коли:

$$W_{in}(c) > \gamma \frac{|V(c)|(|V(c)| - 1)}{2}, \quad (3.19)$$

що еквівалентно умові:

$$\frac{2W_{in}(c)}{|V(c)|(|V(c)| - 1)} > \gamma, \quad (3.20)$$

тобто $\rho_{in}(c) > \gamma$.

Таким чином, параметр γ безпосередньо визначає мінімальну внутрішню щільність спільнот. Збільшення γ призводить до виявлення менших, але більш щільних спільнот; зменшення — до об'єднання в більші, менш щільні групи [87].

3.3.6 Порівняння алгоритмів

Для практичного застосування в аналізі когнітивних карт важливо враховувати особливості кожного алгоритму (табл. 3.1).

Для когнітивних карт середнього розміру (до кількох сотень вершин) усі розглянуті алгоритми працюють достатньо швидко. Рекомендується використовувати алгоритм Leiden або Leiden CPM, оскільки вони гарантують зв'язність виявлених спільнот, що є критично важливим для змістовної інтерпретації результатів у контексті когнітивного моделювання.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика алгоритмів виявлення спільнот

Алгоритм	Складність	Параметри	Гарантія зв'язності
Greedy Modularity	$O(md \log n)$	Немає	Ні
Walktrap	$O(n^2 \log n)$	t (довж. блукання)	Ні
Louvain	$O(n \log n)$	Немає	Ні
Leiden	$O(n \log n)$	Немає	Так
Leiden CPM	$O(n \log n)$	γ (щільність)	Так

3.4 Застосування аналізу спільнот у когнітивному моделюванні

Аналіз спільнот у когнітивних картах виконує кілька важливих функцій: обґрунтування достовірності кількісних характеристик зв'язків, верифікація структури моделі та виявлення функціональних підсистем у складних причинно-наслідкових моделях, поданих у вигляді орієнтованих зважених графів.

3.4.1 Обґрунтування вагових характеристик

При побудові когнітивних карт вагові характеристики зв'язків часто визначаються експертним шляхом, що потребує додаткового обґрунтування [68]. Аналіз спільнот надає критерій для перевірки та корекції вагових коефіцієнтів.

Якщо два фактори належать одній спільноті, це означає наявність сильного функціонального зв'язку між ними. Відповідно, вага зв'язку між такими факторами повинна бути вищою порівняно з факторами з різних спільнот. Формально, для факторів v_i та v_j :

$$|w_{ij}| \geq \bar{w}_{in}, \quad \text{якщо } c(v_i) = c(v_j), \quad (3.21)$$

$$|w_{ij}| \leq \bar{w}_{out}, \quad \text{якщо } c(v_i) \neq c(v_j), \quad (3.22)$$

де $c(v)$ — спільнота, до якої належить вершина v , $\bar{w}_{in}$ та $\bar{w}_{out}$ — середні ваги внутрішніх та зовнішніх зв'язків відповідно.

Якщо до однієї спільноти потрапляють фактори, що не мають сильного взаємозв'язку, це може свідчити про недостовірні кількісні вагові характеристики в когнітивній карті

3.4.2 Виявлення функціональних підсистем

Кожна виявлена спільнота може інтерпретуватися як функціональна підсистема досліджуваної складної системи. Це дозволяє:

- структурувати результати аналізу за тематичними блоками;
- ідентифікувати критичні підсистеми, що потребують першочергової уваги;
- розробляти цільові управлінські впливи для окремих підсистем;
- оцінювати взаємодію між підсистемами через аналіз міжспільнотних зв'язків.

Для когнітивних карт підземної інфраструктури спільноти можуть відповідати таким підсистемам, як: геологічні фактори, економічні показники, технологічні параметри, соціальні чинники тощо. Вперше пошук та аналіз спільнот і модулярності для когнітивних карт було використано в роботі [88].

3.5 Висновки до розділу 3

У третьому розділі дисертаційної роботи розглянуто методи структурного аналізу когнітивних карт, що базуються на симпліціальному аналізі, пошуку та аналізі спільнот і модулярності.

Основні результати розділу:

1. Представлено теоретичні основи симпліціального аналізу, включаючи поняття симплексів, симпліціальних комплексів, q -зв'язності та ексцентриситету. Показано, що ці інструменти дозволяють оцінити багатовимірну структуру зв'язків у когнітивній карті та виявити ізольовані або слабо інтегровані елементи.
2. Розглянуто концепцію спільнот у мережах та міру модулярності як критерій якості розбиття. Детально описано алгоритми виявлення спільнот: Greedy

Modularity, Walktrap, Louvain, Leiden та Leiden CPM, з аналізом їх обчислювальної складності та особливостей застосування.

3. Обґрунтовано застосування аналізу спільнот для обґрунтування кількісних вагових характеристик когнітивної карти, виявлення функціональних підсистем та сприяння досягненню структурної стійкості моделі.

Розроблені методи структурного аналізу забезпечують комплексну оцінку топологічних властивостей когнітивних карт та є важливою складовою методології когнітивного моделювання складних систем. Застосування цих методів до задачі планування підземної інфраструктури розглядається в наступних розділах.

4 ОЦІНЮВАННЯ ПЛАНУВАННЯ ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. КИЄВА

Практичне застосування розробленої методології когнітивного моделювання розглядається на прикладі планування підземної інфраструктури столиці України — міста Києва. Київ є найбільшим мегаполісом країни з населенням понад 3 мільйони мешканців, розвиненою наземною інфраструктурою та значними перспективами освоєння підземного простору [48].

4.1 Генеральний план м. Києва та підземне будівництво

Стратегічне планування розвитку підземної інфраструктури Києва визначається Генеральним планом розвитку міста та низкою галузевих програм. Аналіз цих документів дозволяє сформуванню бази знань для побудови когнітивної моделі та визначити ключові напрямки розвитку підземного простору столиці.

Відповідно до Генерального плану розвитку Києва до 2025 року [91] новим і вкрай важливим напрямком розвитку транспортної інфраструктури столиці повинні були стати протяжні автомобільні тунелі. Будівництво тунелів покликане 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.

Кількість автомобільних тунелів, передбачених Генеральним планом, складе 8, причому три з них пройдуть під Дніпром, а п'ять будуть з'єднувати транспортні артерії міста в межах правого берега (рис. 4.1). За оптимістичним сценарієм у найближчі десятиріччя в Києві може бути споруджено понад 20 км транспортних тунелів.

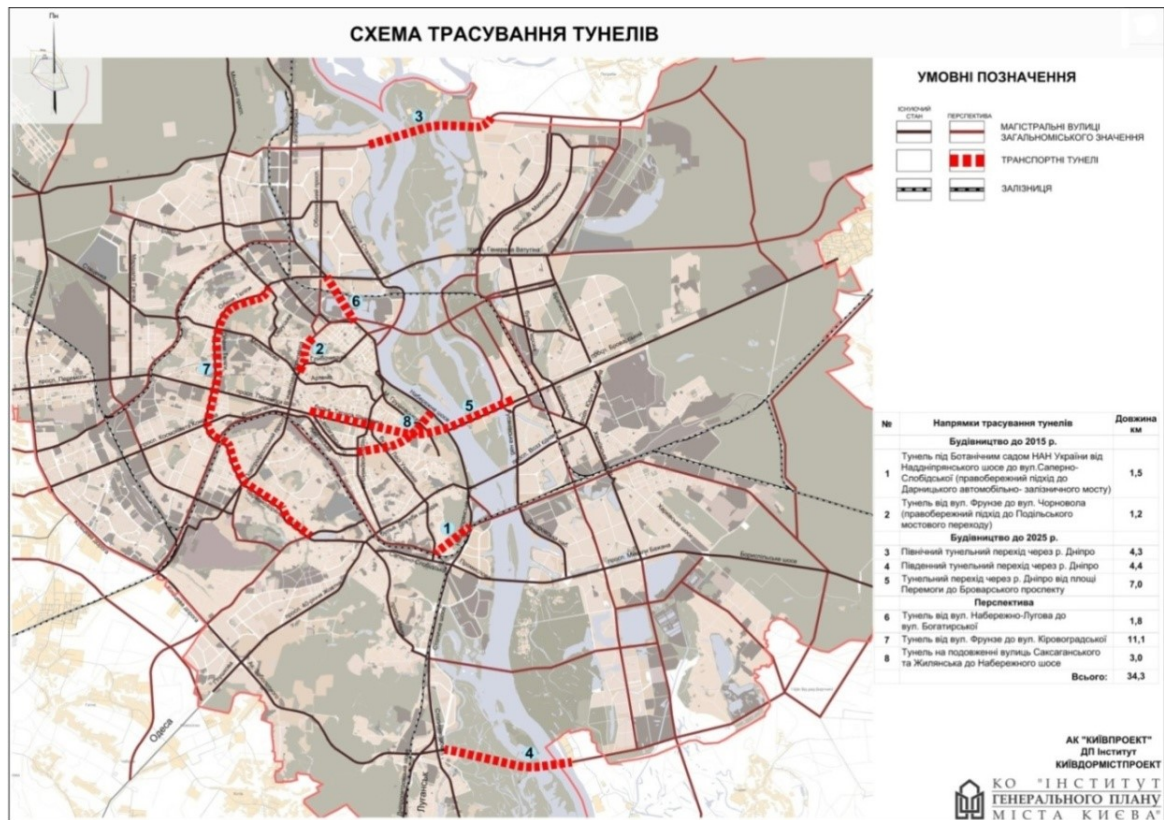


Рис. 4.1 – Схема трасування автомобільних тунелів м. Києва за Генеральним планом

Основні транспортні тунелі, передбачені Генеральним планом, включають:

- три переходи під Дніпром для зв'язку правобережної та лівобережної частин міста;
- тунель під центральною частиною міста для розвантаження історичного середмістя;
- тунелі на правому березі для з'єднання основних транспортних магістралей;
- південний перехід кільцевої дороги навколо Києва.

4.2 Фактори впливу на планування підземного будівництва

Планування підземної інфраструктури Києва визначається комплексом взаємопов'язаних факторів геологічного, технічного, економічного та соціального ха-

рактеру. Систематизація цих факторів є необхідною умовою для побудови когнітивної моделі.

4.2.1 Інженерно-геологічні фактори

Інженерно-геологічні умови м. Києва характеризуються значною неоднорідністю, що суттєво впливає на можливості та вартість підземного будівництва [48]:

- *Геоморфологія території.* Київ розташований на схилах Придніпровської височини та у заплаві Дніпра, що визначає складний рельєф та різноманітність геологічних умов.
- *Літологічний склад ґрунтів.* На території міста поширені лесові породи, піски різної крупності, глини та суглинки. Лесові ґрунти є просадочними і потребують спеціальних заходів при підземному будівництві.
- *Гідрогеологічні умови.* Високий рівень ґрунтових вод у прибережних районах та наявність водоносних горизонтів ускладнюють будівництво глибоких підземних споруд.
- *Небезпечні геологічні процеси.* На території Києва розвинені зсувні процеси (особливо на правобережних схилах), карстові явища та суфозія, що створюють додаткові ризики для підземного будівництва.
- *Пливуні.* Наявність пливунних ґрунтів у долині Дніпра значно ускладнює тунельне будівництво та вимагає застосування спеціальних технологій.

4.2.2 Структурно-функціональні характеристики території

Структурно-функціональні характеристики території визначають доцільність та пріоритетність підземного будівництва [48]:

- *Тип забудови.* Житлова забудова, туристичні об'єкти та парки вимагають особливої уваги до факторів забруднення повітря та шуму. Для промислових зон та незабудованих територій ці фактори мають меншу вагу.
- *Інтенсивність автомобільного руху.* Параметр першочергово впливає на доцільність побудови тунелю — чим інтенсивніший рух буде переведено в тунель, тим більший вплив на зменшення всіх екологічних ризиків.

- *Залюдненість території.* Впливає на вагомість факторів ризику аварій для пішоходів, а також факторів шуму та забруднення.

4.3 Класифікація ризиків підземного будівництва

Підземне будівництво характеризується високим ступенем невизначеності, тому фактор ризику є невід’ємним атрибутом освоєння підземного простору. Систематизація ризиків є необхідною для формування вершин когнітивної карти та оцінки ваг зв’язків між ними.

4.3.1 Ризики, що мінімізуються будівництвом тунелів

Будівництво автомобільних тунелів дозволяє мінімізувати низку екологічних та техногенних ризиків [48]:

- *Забруднення повітря.* При переведенні транспортного потоку в тунель з системою примусової вентиляції та очищення відпрацьованих газів значно зменшується забруднення атмосфери в житлових районах.
- *Шумове забруднення.* Тунельна конструкція ефективно ізолює шум від автомобільного руху.
- *Транспортні затори.* Тунелі забезпечують безперервний рух без світлофорів та пішохідних переходів.
- *Дорожньо-транспортні пригоди.* Однобічний рух у тунелі та відсутність перетинання траєкторій значно знижують ризик аварій.
- *Руйнування дорожнього покриття.* Підземні споруди захищені від впливу атмосферних факторів.

4.3.2 Ризики воєнного характеру

В умовах воєнного стану в Україні особливої актуальності набувають ризики воєнного характеру, які слід враховувати при плануванні підземної інфраструктури [62]:

- ризики пошкодження об’єктів внаслідок ракетних обстрілів та авіаударів;
- можливість використання підземних споруд як укриттів для населення;

- необхідність забезпечення живучості критичної інфраструктури;
- вразливість наземних інженерних мереж порівняно з підземними комунікаціями.

Підземні споруди, зокрема тунелі та станції метрополітену, демонструють значно вищу стійкість до зовнішніх впливів порівняно з наземними об'єктами, що підтверджує доцільність розвитку підземної інфраструктури в умовах сучасних загроз.

4.4 Побудова когнітивної карти підземних об'єктів м. Києва

Для аналізу було обрано два тунелі з Генерального плану міста Києва [91] (рис. 4.1), а саме:

- Тунель 1, що проходить під Ботанічним садом НАН України від Наддніпровського шосе до вулиці Саперно-Слобідської.
- Тунель 5, що проходить через р. Дніпро від площі перемоги до Броварського проспекту.

Вихідні дані для побудови когнітивних карти було взято з результатів етапу передбачення, що проведено в [48]. В тому числі в [48] було виявлено критичні елементи системи, альтернативні параметри, оцінено силу взаємодії виявлених факторів.

Для тунелю 1 було побудовано когнітивну карту, що приведено на рисунку 4.2.

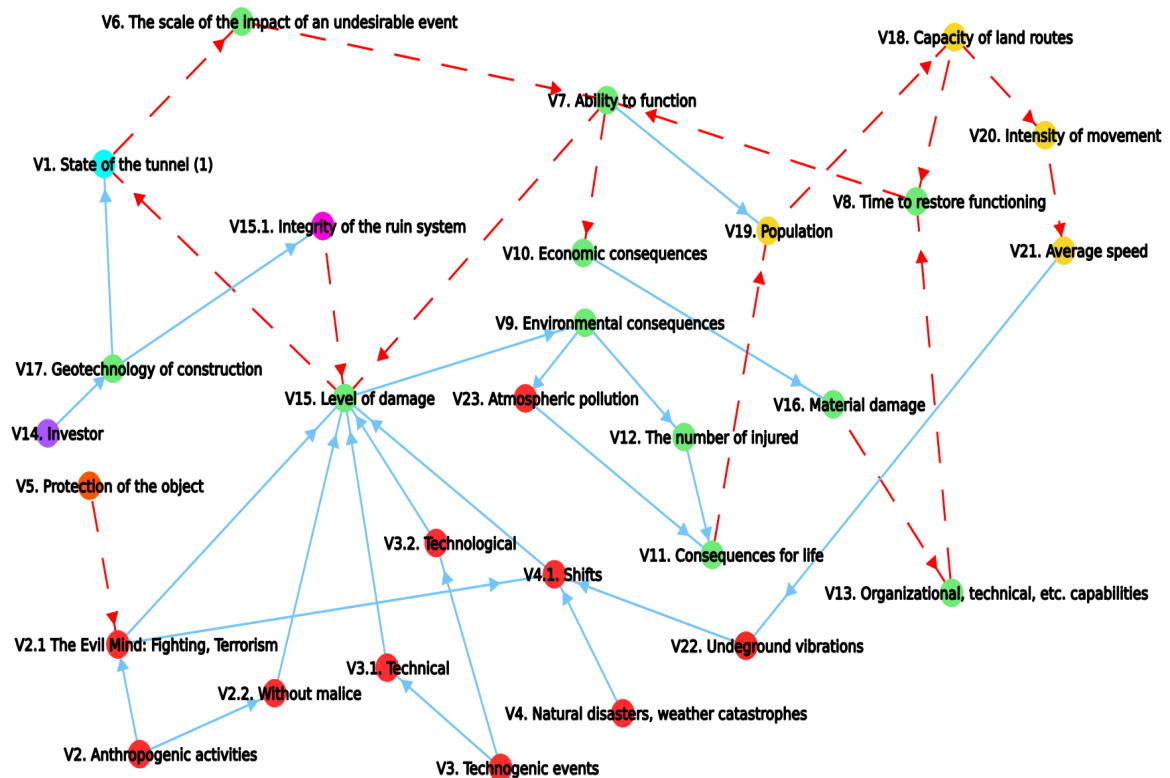


Рис. 4.2 – Когнітивна карта тунелю 1

Дана карта включає в себе вершини, що наведено в таблиці 4.1. Слід зауважити, що наведені в таблиці 4.1 назви деяких вершин можуть відрізнятися від наведених на рисунках, проте залишають той самий порядковий індекс і закладений сенс.

Таблиця 4.1 – Таблиця вершин когнітивної карти тунелю 1

Код	Назва вершини (англ.)	Назва вершини (укр.)	Тип вершини
V1	State of the tunnel (1)	Стан тунелю (1)	Індикативна
V2	Anthropogenic activities	Антропогенна діяльність	Збурююча
V2.1	Malicious intent: Fighting, Terrorism	Зловмисний намір: бойові дії, тероризм	Збурююча
V2.2	Without malice	Без злого наміру	Збурююча
V3	Technogenic events	Техногенні події	Збурююча
V3.1	Technical	Технічні	Збурююча
V3.2	Technological	Технологічні	Збурююча
V4	Natural disasters, weather catastrophes	Природні катастрофи, погодні катаклізми	Збурююча

Таблиця 4.1 – (продовження)

Код	Назва вершини (англ.)	Назва вершини (укр.)	Тип вершини
V4.1	Shifts	Зсуви	Збурююча
V5	Protection of the object	Захист об'єкта	Базова
V6	Impact of an undesirable event	Вплив небажаної події	Регулююча
V7	Ability to function	Здатність функціонувати	Регулююча
V8	Time to restore functioning	Час відновлення функціонування	Регулююча
V9	Environmental consequences	Екологічні наслідки	Регулююча
V10	Economic consequences	Економічні наслідки	Регулююча
V11	Consequences for life	Наслідки для життєдіяльності	Регулююча
V12	The number of injured	Кількість постраждалих	Регулююча
V13	Organizational, technical, etc. capabilities	Організаційні, технічні та ін. можливості	Базова
V14	Investor	Інвестор	Базова
V15	Level of damage	Рівень пошкодження	Регулююча
V15.1	Integrity of the system	Цілісність системи	Базова
V16	Material damage	Матеріальні збитки	Регулююча
V17	Geotechnology of construction	Геотехнологія будівництва	Базова
V18	Capacity of land routes	Пропускна здатність наземних маршрутів	Базова
V19	Population	Населення	Базова
V20	Intensity of movement	Інтенсивність руху	Регулююча
V21	Average speed	Середня швидкість	Регулююча
V22	Underground vibrations	Підземні вібрації	Регулююча
V23	Atmospheric pollution	Атмосферне забруднення	Регулююча

Для тунелю 5 було побудовано когнітивну карту, що приведено на рисунку 4.3.

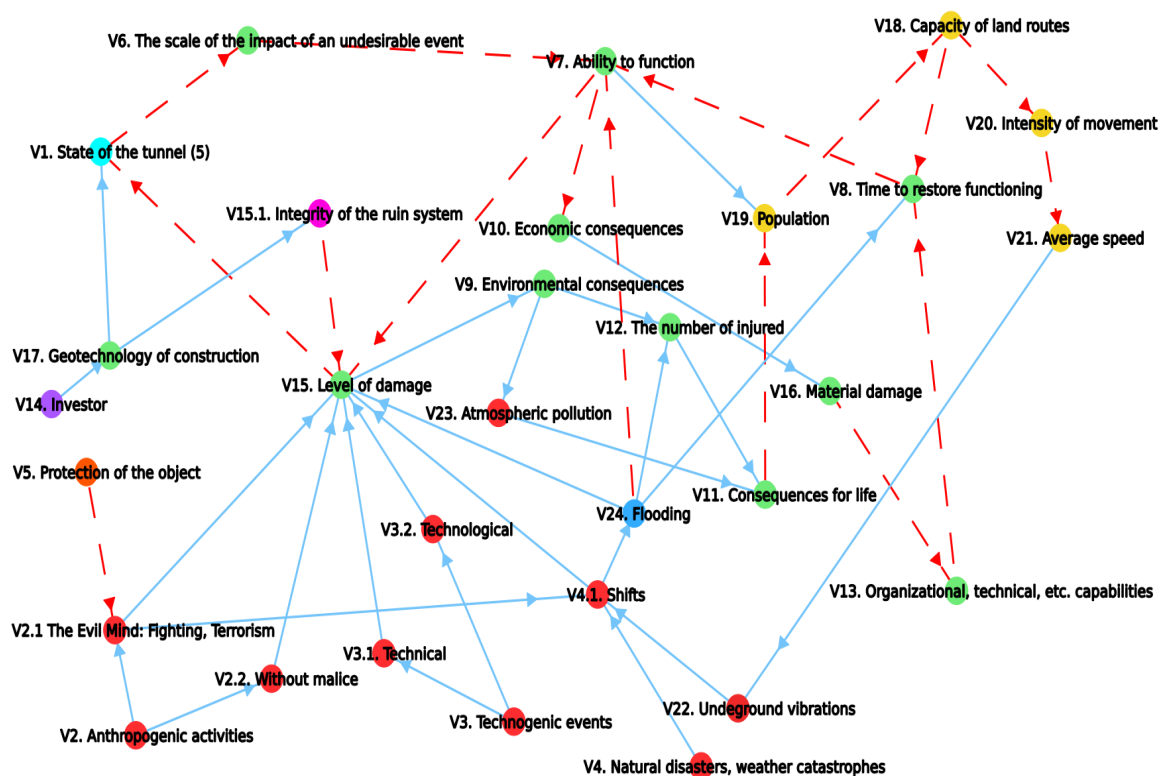


Рис. 4.3 – Когнітивна карта тунелю 5

Когнітивна карта тунелю 5 має майже ті самі вершини, що й тунель 1, проте, оскільки частина тунелю проходить повз р. Дніпро, додатково враховується ризик підтоплення тунелю. Вершини когнітивної карти тунелю 5, що відрізняються від тунелю 1 (табл. 4.1), зазначені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Таблиця вершин когнітивної карти тунелю 5

Код	Назва вершини (англ.)	Назва вершини (укр.)	Тип вершини
V1	State of the tunnel (5)	Стан тунелю (5)	Індикативна
V24	Flooding	Підтоплення	Регулююча

4.5 Побудова когнітивної моделі підземних об'єктів м. Києва

Як було зазначено в розділі 2, після побудови когнітивної карти, для побудови когнітивної моделі застосовуються процедури:

1. Обґрунтування чисельної стійкості.
2. Обґрунтування структурної стійкості

3. Обґрунтування структурної цілісності системи за допомогою симпліціального аналізу
4. Обґрунтування кількісних вагових характеристик використовуючи пошук та аналіз спільнот на основі модулярності

Наступні підрозділи (4.6- 4.13) включають в себе проведення даних процедур і приведення когнітивних карт тунелів 1 і 5 до заданих вимог. Тільки після проведення всіх зазначених етапів, ми отримуємо когнітивну модель, яку можна використовувати для процедур імпульсного когнітивного моделювання.

4.6 Обґрунтування чисельної стійкості

Для обґрунтування чисельної стійкості когнітивних карт тунелів 1 і 5 обраховується спектральних радіус ρ їх матриць суміжності. У випадку, якщо $\rho < 1$, карта вважається чисельно стійкою (див. підрозділ 2.5).

Для аналізу спектрального радіусу тунелів 1 і 5 було застосовано бібліотеку Eigen, що дає змогу знайти власні значення матриць засобами мови C++.

4.6.1 Обґрунтування чисельної стійкості тунеля 1

Розрахунок власних значень матриці суміжності когнітивної карти тунелю 1 наведено на рисинку 4.4. З даного розрахунку можна побачити, що максимальне за модулем власне значення матриці суміжності, тобто спектральний радіус тунелю 1, дорівнює $\rho = 0.96931 < 1$, що свідчить про чисельну стійкість когнітивної карти тунелю 1.

	Re	Im	Abs
7	0.00000	0.00000	0.00000
8	0.00000	0.00000	0.00000
9	0.00000	0.00000	0.00000
10	0.00000	0.00000	0.00000
11	-0.00006	-0.00006	0.00008
12	-0.00006	0.00006	0.00008
13	0.00006	-0.00006	0.00008
14	0.00006	0.00006	0.00008
15	0.12135	-0.37340	0.39262
16	0.12135	0.37340	0.39262
17	0.39315	0.00000	0.39315
18	-0.31792	0.23165	0.39337
19	-0.31792	-0.23165	0.39337
20	-0.72479	-0.49103	0.87546
21	-0.72479	0.49103	0.87546
22	0.72459	-0.49231	0.87602
23	0.72459	0.49231	0.87602
24	-0.24082	0.89912	0.93081
25	-0.24082	-0.89912	0.93081
26	0.23999	-0.90090	0.93232
27	0.23999	0.90090	0.93232
28	-0.96727	0.00000	0.96727
29	0.96931	0.00000	0.96931

Рис. 4.4 – Власні значення когнітивної карти тунелю 1

4.6.2 Обґрунтування чисельної стійкості тунеля 5

Розрахунок власних значень матриці суміжності когнітивної карти тунелю 5 наведено на рисунку 4.5. З даного розрахунку можна побачити, що максимальне за модулем власне значення матриці суміжності, тобто спектральний радіус тунелю 5, дорівнює $\rho = 0.99902 < 1$, що свідчить про чисельну стійкість когнітивної карти тунелю 5. Значення близьке до 1 може свідчити про повільне затухання збурень.

	Re	Im	Abs
8	0.00000	0.00000	0.00000
9	0.00000	0.00000	0.00000
10	-0.00000	0.00000	0.00000
11	-0.00004	0.00004	0.00006
12	-0.00004	-0.00004	0.00006
13	0.00004	0.00004	0.00006
14	0.00004	-0.00004	0.00006
15	-0.23773	0.00000	0.23773
16	0.37193	0.00000	0.37193
17	0.09879	-0.39439	0.40658
18	0.09879	0.39439	0.40658
19	-0.29373	-0.28724	0.41083
20	-0.29373	0.28724	0.41083
21	-0.69585	0.47859	0.84454
22	-0.69585	-0.47859	0.84454
23	0.75693	-0.50321	0.90893
24	0.75693	0.50321	0.90893
25	-0.21552	-0.89246	0.91812
26	-0.21552	0.89246	0.91812
27	0.25729	0.89208	0.92844
28	0.25729	-0.89208	0.92844
29	-0.94903	0.00000	0.94903
30	0.99902	0.00000	0.99902

Рис. 4.5 – Власні значення когнітивної карти тунелю 5

З проведеного аналізу чисельної стійкості, було виявлено, що когнітивні карти тунелю 1 і тунелю 5 чисельно стійкі за критерієм Ляпунова, що означає, що при імпульсному когнітивному моделюванні, коливання мають сходиться до якогось кінцевого значення. Наступним кроком є перевірка структурної стійкості когнітивних карт.

4.7 Обґрунтування структурної стійкості

Для обґрунтування структурної стійкості когнітивних карт тунелів 1 і 5, залучається аналіз циклів графу когнітивної карти. Когнітивна карта вважається структурно стійкою, якщо кількість позитивних (дестабілізуючих) циклів не перевищує кількість негативних (стабілізуючих) циклів (див. підрозділ 2.4.2).

4.7.1 Обґрунтування структурної стійкості тунеля 1

Пошук та аналіз циклів когнітивної карти тунелю 1 наведено на рисунку 4.6. Даний аналіз показує структурну нестійкість когнітивної карти тунелю 1, оскільки кількість дестабілізуючих циклів (5) перевищує кількість стабілізуючих (3).

```
V1->V6->V7->V15->V1
V1->V6->V7->V19->V18->V20->V21->V22->V4.1-
>V15->V1
V23->V11->V19->V18->V8->V7->V15->V9->V23
V23->V11->V19->V18->V20->V21->V22->V4.1->V15-
>V9->V23
V4.1->V15->V9->V12->V11->V19->V18->V20->V21-
>V22->V4.1
V7->V10->V16->V13->V8->V7
V7->V15->V9->V12->V11->V19->V18->V8->V7
V7->V19->V18->V8->V7
Number of cycles: 8
Positive cycles number: 5
Negative cycles number: 3
Structurally unstable map
The cognitive map is numerically stable
```

Рис. 4.6 – Аналіз циклів когнітивної карти тунелю 1

4.7.2 Обґрунтування структурної стійкості тунеля 5

Пошук та аналіз циклів когнітивної карти тунелю 5 наведено на рисунку 4.7. Даний аналіз показує структурну нестійкість когнітивної карти тунелю 5, оскільки кількість дестабілізуючих циклів (15) перевищує кількість стабілізуючих (3).

Результати аналізу структурної стійкості графів когнітивних карт тунелів 1 і 5 показали структурну нестійкість даних когнітивних карт, тому на наступному

кроці залучаються методи симпліціального аналізу для виявлення причин структурної нецілісності та приведення карти до структурно стійкого виду.

```

V23->V11->V19->V18->V20->V21->V22->V4.1-
>V15->V9->V23
V23->V11->V19->V18->V20->V21->V22->V4.1-
>V24->V7->V15->V9->V23
V23->V11->V19->V18->V20->V21->V22->V4.1-
>V24->V8->V7->V15->V9->V23
V23->V11->V19->V18->V20->V21->V22->V4.1-
>V24->V15->V9->V23
V4.1->V15->V9->V12->V11->V19->V18->V20-
>V21->V22->V4.1
V4.1->V24->V7->V15->V9->V12->V11->V19->V18-
>V20->V21->V22->V4.1
V4.1->V24->V7->V19->V18->V20->V21->V22-
>V4.1
V4.1->V24->V8->V7->V15->V9->V12->V11->V19-
>V18->V20->V21->V22->V4.1
V4.1->V24->V8->V7->V19->V18->V20->V21->V22-
>V4.1
V4.1->V24->V12->V11->V19->V18->V20->V21-
>V22->V4.1
V4.1->V24->V15->V9->V12->V11->V19->V18-
>V20->V21->V22->V4.1
V7->V10->V16->V13->V8->V7
V7->V15->V9->V12->V11->V19->V18->V8->V7
V7->V19->V18->V8->V7
Number of cycles: 18
Positive cycles number: 15
Negative cycles number: 3
Structurally unstable map
The cognitive map is numerically stable

```

Рис. 4.7 – Аналіз циклів когнітивної карти тунелю 5

4.8 Обґрунтування структурної цілісності за допомогою симпліціального аналізу

Для обґрунтування структурної цілісності системи залучаються процедури симпліціального аналізу.

4.8.1 Обґрунтування структурної цілісності тунеля 1

Побудуємо примальний симпліціальний комплекс K_{V_Y} . Симплекси, що входять в K_{V_Y} наведено в таблиці 4.3, графічне представлення K_{V_Y} наведено на рисунку 4.8.

Таблиця 4.3 – Симпліціальний комплекс K_{V_Y}

Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_1^{V1}	State of the tunnel (1)	V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction
σ_0^{V10}	Economic consequences	V7. Ability to function
σ_1^{V11}	Consequences for life	V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution
σ_0^{V12}	The number of injured	V9. Environmental consequences
σ_{-1}^{V14}	Investor	
σ_6^{V15}	Level of damage	V15.1. Integrity of the system, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V3.1. Technical, V3.2. Technological, V4.1. Shifts, V7. Ability to function
σ_0^{V16}	Material damage	V10. Economic consequences
σ_0^{V17}	Geotechnology of construction	V14. Investor
σ_0^{V18}	Capacity of land routes	V19. Population
σ_1^{V19}	Population	V11. Consequences for life, V7. Ability to function
σ_{-1}^{V2}	Anthropogenic activities	
$\sigma_1^{V2.1}$	Malicious intent: Fighting, Terrorism	V2. Anthropogenic activities, V5. Protection of the object
σ_0^{V20}	Intensity of movement	V18. Capacity of land routes
σ_0^{V21}	Average speed	V20. Intensity of movement
σ_0^{V22}	Underground vibrations	V21. Average speed

Таблиця 4.3 – (продовження)

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_0^{V23}	Atmospheric pollution	V9. Environmental consequences
σ_{-1}^{V3}	Technogenic events	
σ_{-1}^{V4}	Natural disasters, weather catastrophes	
σ_{-1}^{V5}	Protection of the object	
σ_0^{V6}	The scale of the impact of an undesirable event	V1. State of the tunnel (1)
σ_1^{V7}	Ability to function	V6. The scale of the impact of an undesirable event, V8. Time to restore functioning
σ_1^{V8}	Time to restore functioning	V13. Organizational, technical, etc. capabilities, V18. Capacity of land routes
σ_0^{V9}	Environmental consequences	V15. Level of damage
σ_0^{V13}	Organizational, technical, etc. capabilities	V16. Material damage
$\sigma_0^{V15.1}$	Integrity of the system	V17. Geotechnology of construction
$\sigma_0^{V2.2}$	Without malice	V2. Anthropogenic activities
$\sigma_0^{V3.1}$	Technical	V3. Technogenic events
$\sigma_0^{V3.2}$	Technological	V3. Technogenic events
$\sigma_2^{V4.1}$	Shifts	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V22. Underground vibrations, V4. Natural disasters, weather catastrophes

наближеною. Таким чином, множина симплексів комплексу розбивається на q -зв'язні компоненти, а їх кількість Q_q (у табл. 4.4 позначено як N) є елементом структурного (Q-)вектора комплексу.

Таблиця 4.4 – Аналіз q -зв'язності для симпліціального комплексу K_{V_Y}

q	N	Вершини
6	1	{V15. Level of damage}
5	1	{V15. Level of damage}
4	1	{V15. Level of damage}
3	1	{V15. Level of damage}
2	2	{V4.1. Shifts}, {V15. Level of damage}
1	8	{V1. State of the tunnel (1)}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V4.1. Shifts}, {V7. Ability to function}, {V8. Time to restore functioning}, {V11. Consequences for life}, {V15. Level of damage}, {V19. Population}
0	15	{V1. State of the tunnel (1), V15.1. Integrity of the system, V9. Environmental consequences}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice}, {V3.1. Technical, V3.2. Technological}, {V23. Atmospheric pollution, V12. The number of injured}, {V4.1. Shifts, V15. Level of damage, V19. Population, V10. Economic consequences}, {V6. The scale of the impact of an undesirable event}, {V7. Ability to function}, {V8. Time to restore functioning, V20. Intensity of movement},

Таблиця 4.4 – (продовження)

q	N	Вершини
		{V11. Consequences for life}, {V13. Organizational, technical, etc. capabilities}, {V16. Material damage}, {V17. Geotechnology of construction}, {V18. Capacity of land routes}, {V21. Average speed}, {V22. Underground vibrations}

Результати q -аналізу для K_{V_Y} показують, що максимальний рівень зв'язності досягається для $q_{\max} = 6$, і на рівнях $q = 6$, $q = 5$, $q = 4$, $q = 3$ існує лише одна q -зв'язна компонента, яка складається з симплексу σ_6^{V15} . Для $q = 2$ комплекс розпадається на 2 окремі компоненти, що свідчить про зниження щільності зв'язків. Для $q = 1$ комплекс розпадається на 8 компонент.

Структурний (Q-)вектор комплексу K_{V_Y} має вигляд:

$$\mathbf{Q}(K_{V_Y}) = (Q_6, Q_5, Q_4, Q_3, Q_2, Q_1, Q_0) = (1, 1, 1, 1, 2, 8, 15).$$

Додатково обчислено ексцентриситети вершин, що утворюють симплекси у симпліціальному комплексі K_{V_Y} (табл. 4.5), що відображають віддаленість кожного симплексу від решти структури.

Таблиця 4.5 – Ексцентриситети елементів комплексу K_{V_Y}

Ексцентриситет	Значення
$\text{ecc}(V1. \text{State of the tunnel (1)})$	1
$\text{ecc}(V10. \text{Economic consequences})$	0
$\text{ecc}(V11. \text{Consequences for life})$	∞
$\text{ecc}(V12. \text{The number of injured})$	0
$\text{ecc}(V15. \text{Level of damage})$	6
$\text{ecc}(V16. \text{Material damage})$	∞
$\text{ecc}(V17. \text{Geotechnology of construction})$	∞
$\text{ecc}(V18. \text{Capacity of land routes})$	∞

Таблиця 4.5 – (продовження)

Ексцентриситет	Значення
$\text{ecc}(V19. \textit{Population})$	1
$\text{ecc}(V2.1 \textit{ Malicious intent : Fighting, Terrorism})$	1
$\text{ecc}(V20. \textit{Intensity of movement})$	0
$\text{ecc}(V21. \textit{Average speed})$	∞
$\text{ecc}(V22. \textit{Underground vibrations})$	∞
$\text{ecc}(V23. \textit{Atmospheric pollution})$	0
$\text{ecc}(V6. \textit{The scale of the impact of an undesirable event})$	∞
$\text{ecc}(V7. \textit{Ability to function})$	∞
$\text{ecc}(V8. \textit{Time to restore functioning})$	1
$\text{ecc}(V9. \textit{Environmental consequences})$	0
$\text{ecc}(V13. \textit{Organizational, technical, etc. capabilities})$	∞
$\text{ecc}(V15.1. \textit{Integrity of the system})$	0
$\text{ecc}(V2.2. \textit{Without malice})$	0
$\text{ecc}(V3.1. \textit{Technical})$	0
$\text{ecc}(V3.2. \textit{Technological})$	0
$\text{ecc}(V4.1. \textit{Shifts})$	2

Як показує аналіз, дев'ять вершин мають значення ексцентриситету ∞ , що відповідає їхній ізольованості в межах комплексу. Це вказує на нецілісну структуру K_{V_Y} та обмеження щодо зв'язності й керованості системи.

4.8.2 Обґрунтування структурної цілісності тунеля 5

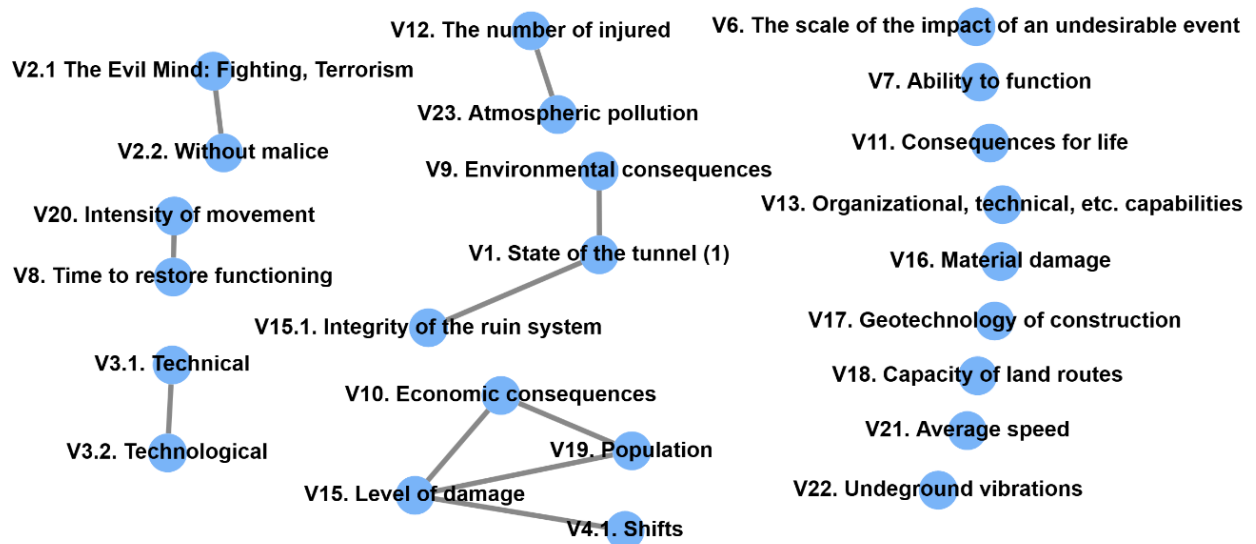
Побудуємо дуальний симпліціальний комплекс K_{V_X} . Симплекси, що входять в K_{V_X} наведено в таблиці 4.6, графічне представлення K_{V_X} наведено на рисунку 4.9.

Таблиця 4.6 – Симпліціальний комплекс K_{V_X}

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_0^{V1}	State of the tunnel (1)	V6. The scale of the impact of an undesirable event
σ_0^{V10}	Economic consequences	V16. Material damage
σ_0^{V11}	Consequences for life	V19. Population
σ_0^{V12}	The number of injured	V11. Consequences for life
σ_0^{V14}	Investor	V17. Geotechnology of construction
σ_1^{V15}	Level of damage	V1. State of the tunnel (1), V9. Environmental consequences
σ_0^{V16}	Material damage	V13. Organizational, technical, etc. capabilities
σ_1^{V17}	Geotechnology of construction	V1. State of the tunnel (1), V15.1. Integrity of the system
σ_1^{V18}	Capacity of land routes	V20. Intensity of movement, V8. Time to restore functioning
σ_0^{V19}	Population	V18. Capacity of land routes
σ_1^{V2}	Anthropogenic activities	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice
$\sigma_1^{V2.1}$	Malicious intent: Fighting, Terrorism	V15. Level of damage, V4.1. Shifts
σ_0^{V20}	Intensity of movement	V21. Average speed
σ_0^{V21}	Average speed	V22. Underground vibrations
σ_0^{V22}	Underground vibrations	V4.1. Shifts
σ_0^{V23}	Atmospheric pollution	V11. Consequences for life
σ_1^{V3}	Technogenic events	V3.1. Technical, V3.2. Technological
σ_0^{V4}	Natural disasters, weather catastrophes	V4.1. Shifts
σ_0^{V5}	Protection of the object	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism
σ_0^{V6}	The scale of the impact of an undesirable event	V7. Ability to function

Таблиця 4.6 – (продовження)

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_2^{V7}	Ability to function	V10. Economic consequences, V15. Level of damage, V19. Population
σ_0^{V8}	Time to restore functioning	V7. Ability to function
σ_1^{V9}	Environmental consequences	V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution
σ_0^{V13}	Organizational, technical, etc. capabilities	V8. Time to restore functioning
$\sigma_0^{V15.1}$	Integrity of the system	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V2.2}$	Without malice	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V3.1}$	Technical	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V3.2}$	Technological	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V4.1}$	Shifts	V15. Level of damage

Рис. 4.9 – Симпліціальний комплекс K_{V_X}

Симпліціальний комплекс K_{V_X} містить один 2-вимірний симплекс — σ_2^{V7} , сім 1-вимірних симплексів — σ_1^{V2} , $\sigma_1^{V2.1}$, σ_1^{V3} , σ_1^{V9} , σ_1^{V15} , σ_1^{V17} , σ_1^{V18} , двадцять один

0-вимірних симплексів — $\sigma_0^{V1}, \sigma_0^{V2.2}, \sigma_0^{V3.1}, \sigma_0^{V3.2}, \sigma_0^{V4}, \sigma_0^{V23}, \sigma_0^{V4.1}, \sigma_0^{V5}, \sigma_0^{V6}, \sigma_0^{V8}, \sigma_0^{V10}, \sigma_0^{V11}, \sigma_0^{V12}, \sigma_0^{V13}, \sigma_0^{V14}, \sigma_0^{V15.1}, \sigma_0^{V16}, \sigma_0^{V19}, \sigma_0^{V20}, \sigma_0^{V21}, \sigma_0^{V22}$.

Симпліціальний комплекс K_{V_X} не утворює повного графа, що може свідчити про недостатню зв'язність системи. Найінформативнішим симплексом є σ_2^{V7} , сформований вершиною V7 (Ability to function), який об'єднує 3 вершини. Вилучення вершини V7 призводило б до втрати керованості системи.

Перейдемо до q -аналізу симпліціального комплексу K_{V_X} . Розбиття на q -зв'язні компоненти наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Аналіз q -зв'язності для симпліціального комплексу K_{V_X}

q	N	Вершини
2	1	{V7. Ability to function}
1	8	{V2. Anthropogenic activities}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V3. Technogenic events}, {V7. Ability to function}, {V9. Environmental consequences}, {V15. Level of damage}, {V17. Geotechnology of construction}, {V18. Capacity of land routes}
0	15	{V1. State of the tunnel (1)}, {V2. Anthropogenic activities, V5. Protection of the object}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V22. Underground vibrations, V4. Natural disasters, weather catastrophes, V15.1. Integrity of the system, V7. Ability to function,

Таблиця 4.7 – (продовження)

q	N	Вершини
		V11. Consequences for life, V4.1. Shifts, V3.2. Technological, V3.1. Technical, V2.2. Without malice}, {V3. Technogenic events}, {V23. Atmospheric pollution, V12. The number of injured}, {V6. The scale of the impact of an undesirable event, V8. Time to restore functioning}, {V9. Environmental consequences}, {V10. Economic consequences}, {V13. Organizational, technical, etc. capabilities, V18. Capacity of land routes}, {V14. Investor}, {V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction}, {V16. Material damage}, {V19. Population}, {V20. Intensity of movement}, {V21. Average speed}

Результати q -аналізу для K_{V_X} показують, що максимальний рівень зв'язності досягається для $q_{\max} = 2$ існує лише одна q -зв'язна компонента, яка складається з симплексу σ_2^{V7} . Для $q = 1$ комплекс розпадається на 8 компонент, що свідчить про зниження щільності зв'язків. Для $q = 0$ комплекс розпадається на 15 компонент.

Структурний (Q-)вектор комплексу K_{V_X} має вигляд:

$$\mathbf{Q}(K_{V_X}) = (Q_2, Q_1, Q_0) = (1, 8, 15).$$

Додатково обчислено ексцентриситети вершин, що утворюють симплекси у симпліціальному комплексу K_{V_X} (табл. 4.8), що відображають віддаленість кожного симплексу від решти структури.

Таблиця 4.8 – Ексцентриситети елементів комплексу K_{V_X}

Ексцентриситет	Значення
$\text{ecc}(V1. \textit{State of the tunnel (1)})$	∞
$\text{ecc}(V10. \textit{Economic consequences})$	∞
$\text{ecc}(V11. \textit{Consequences for life})$	0
$\text{ecc}(V12. \textit{The number of injured})$	0
$\text{ecc}(V14. \textit{Investor})$	∞
$\text{ecc}(V15. \textit{Level of damage})$	1

Таблиця 4.8 – (продовження)

Ексцентриситет	Значення
$ecc(V16. Material\ damage)$	∞
$ecc(V17. Geotechnology\ of\ construction)$	1
$ecc(V18. Capacity\ of\ land\ routes)$	1
$ecc(V19. Population)$	∞
$ecc(V2. Anthropogenic\ activities)$	1
$ecc(V2.1 Malicious\ intent : Fighting, Terrorism)$	1
$ecc(V20. Intensity\ of\ movement)$	∞
$ecc(V21. Average\ speed)$	∞
$ecc(V22. Underground\ vibrations)$	0
$ecc(V23. Atmospheric\ pollution)$	0
$ecc(V3. Technogenic\ events)$	∞
$ecc(V4. Natural\ disasters, weather\ catastrophes)$	0
$ecc(V5. Protection\ of\ the\ object)$	0
$ecc(V6. The\ scale\ of\ the\ impact\ of\ an\ undesirable\ event)$	0
$ecc(V7. Ability\ to\ function)$	2
$ecc(V8. Time\ to\ restore\ functioning)$	0
$ecc(V9. Environmental\ consequences)$	∞
$ecc(V13. Organizational, technical, etc. capabilities)$	0
$ecc(V15.1. Integrity\ of\ the\ system)$	0
$ecc(V2.2. Without\ malice)$	0
$ecc(V3.1. Technical)$	0
$ecc(V3.2. Technological)$	0
$ecc(V4.1. Shifts)$	0

Як показує аналіз, дев'ять вершин мають значення ексцентриситету ∞ , що відповідає їхній ізольованості в межах комплексу. Це вказує на нецілісну структуру K_{V_X} та обмеження щодо зв'язності й керованості системи.

Перейдемо до аналізу тунеля 5.

Побудуємо примальний симпліціальний комплекс K_{V_Y} . Симплекси, що входять в K_{V_Y} наведено в таблиці 4.9, графічне представлення K_{V_Y} наведено на рисунку 4.10.

Таблиця 4.9 – Симпліціальний комплекс K_{V_Y}

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_1^{V1}	State of the tunnel (5)	V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction
σ_0^{V10}	Economic consequences	V7. Ability to function
σ_1^{V11}	Consequences for life	V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution
σ_1^{V12}	The number of injured	V24. Flooding, V9. Environmental consequences
σ_{-1}^{V14}	Investor	
σ_7^{V15}	Level of damage	V15.1. Integrity of the system, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V24. Flooding, V3.1. Technical, V3.2. Technological, V4.1. Shifts, V7. Ability to function
σ_0^{V16}	Material damage	V10. Economic consequences
σ_0^{V17}	Geotechnology of construction	V14. Investor
σ_0^{V18}	Capacity of land routes	V19. Population
σ_1^{V19}	Population	V11. Consequences for life, V7. Ability to function
σ_{-1}^{V2}	Anthropogenic activities	
$\sigma_1^{V2.1}$	Malicious intent: Fighting, Terrorism	V2. Anthropogenic activities, V5. Protection of the object
σ_0^{V20}	Intensity of movement	V18. Capacity of land routes
σ_0^{V21}	Average speed	V20. Intensity of movement
σ_0^{V22}	Underground vibrations	V21. Average speed
σ_0^{V23}	Atmospheric pollution	V9. Environmental consequences
σ_0^{V24}	Flooding	V4.1. Shifts
σ_{-1}^{V3}	Technogenic events	

Таблиця 4.9 – (продовження)

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_{-1}^{V4}	Natural disasters, weather catastrophes	
σ_{-1}^{V5}	Protection of the object	
σ_0^{V6}	The scale of the impact of an undesirable event	V1. State of the tunnel (5)
σ_2^{V7}	Ability to function	V24. Flooding, V6. The scale of the impact of an undesirable event, V8. Time to restore functioning
σ_2^{V8}	Time to restore functioning	V13. Organizational, technical, etc. capabilities, V18. Capacity of land routes, V24. Flooding
σ_0^{V9}	Environmental consequences	V15. Level of damage
σ_0^{V13}	Organizational, technical, etc. capabilities	V16. Material damage
$\sigma_0^{V15.1}$	Integrity of the system	V17. Geotechnology of construction
$\sigma_0^{V2.2}$	Without malice	V2. Anthropogenic activities
$\sigma_0^{V3.1}$	Technical	V3. Technogenic events
$\sigma_0^{V3.2}$	Technological	V3. Technogenic events
$\sigma_2^{V4.1}$	Shifts	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V22. Underground vibrations, V4. Natural disasters, weather catastrophes

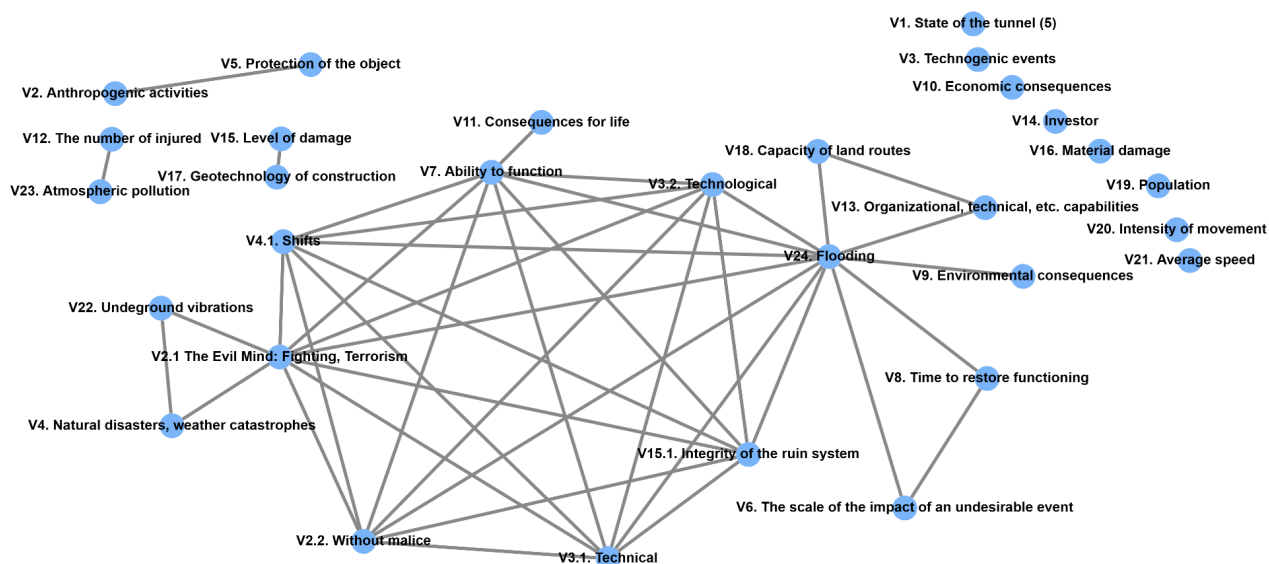


Рис. 4.10 – Симпліціальний комплекс K_{V_Y}

Симпліціальний комплекс K_{V_Y} містить один 7-вимірний симплекс — σ_7^{V15} , три 2-вимірні симплекси — $\sigma_2^{V4.1}$, σ_2^{V7} та σ_2^{V8} , п'ять 1-вимірних симплексів — σ_1^{V1} , $\sigma_1^{V2.1}$, σ_1^{V11} , σ_1^{V12} , σ_1^{V19} , шістнадцять 0-вимірних симплексів — $\sigma_0^{V2.2}$, $\sigma_0^{V3.1}$, $\sigma_0^{V3.2}$, σ_0^{V23} , σ_0^{V6} , σ_0^{V9} , σ_0^{V10} , σ_0^{V13} , $\sigma_0^{V15.1}$, σ_0^{V16} , σ_0^{V17} , σ_0^{V18} , σ_0^{V20} , σ_0^{V21} , σ_0^{V22} , σ_0^{V24} .

Крім того, K_{V_Y} містить п'ять порожніх симплексів (тобто таких, що не містять вершин і мають розмірність -1): σ_{-1}^{V2} , σ_{-1}^{V3} , σ_{-1}^{V4} , σ_{-1}^{V5} , σ_{-1}^{V14} .

Аналіз структури K_{V_Y} виявляє фрагментацію системи. Наявність порожніх симплексів свідчить про вершини без вхідних впливів. Нескінченні ексцентриситети вказують на ізольовані компоненти.

Найінформативнішим симплексом є σ_7^{V15} , сформований вершиною V15 (Level of damage), який об'єднує 8 вершин. Вилучення вершини V15 призводило б до зміни структури системи.

Перейдемо до q -аналізу симпліціального комплексу K_{V_Y} . Розбиття на q -зв'язні компоненти наведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Аналіз q -зв'язності для симпліціального комплексу K_{V_Y}

q	N	Вершини
7	1	{V15. Level of damage}
6	1	{V15. Level of damage}

Таблиця 4.10 – (продовження)

<i>q</i>	N	Вершини
5	1	{V15. Level of damage}
4	1	{V15. Level of damage}
3	1	{V15. Level of damage}
2	4	{V4.1. Shifts}, {V7. Ability to function}, {V8. Time to restore functioning}, {V15. Level of damage}
1	9	{V1. State of the tunnel (5)}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V4.1. Shifts}, {V7. Ability to function}, {V8. Time to restore functioning}, {V11. Consequences for life}, {V12. The number of injured}, {V15. Level of damage}, {V19. Population}
0	12	{V1. State of the tunnel (5), V15.1. Integrity of the system, V9. Environmental consequences}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice}, {V3.1. Technical, V3.2. Technological}, {V23. Atmospheric pollution, V12. The number of injured,

Таблиця 4.10 – (продовження)

q	N	Вершини
		V15. Level of damage, V24. Flooding, V19. Population, V10. Economic consequences, V8. Time to restore functioning, V20. Intensity of movement, V7. Ability to function, V4.1. Shifts}, {V6. The scale of the impact of an undesirable event}, {V11. Consequences for life}, {V13. Organizational, technical, etc. capabilities}, {V16. Material damage}, {V17. Geotechnology of construction}, {V18. Capacity of land routes}, {V21. Average speed}, {V22. Underground vibrations}

Результати q -аналізу для K_{V_Y} показують, що максимальний рівень зв'язності досягається для $q_{\max} = 7$, і на рівнях $q = 7, q = 6, q = 5, q = 4, q = 3$ існує лише одна q -зв'язна компонента, яка складається з симплексу σ_7^{V15} . Для $q = 2$ комплекс розпадається на 4 окремі компоненти, що свідчить про зниження щільності зв'язків. Для $q = 1$ комплекс розпадається на 9 компонент.

Структурний (Q-)вектор комплексу K_{V_Y} має вигляд:

$$\mathbf{Q}(K_{V_Y}) = (Q_7, Q_6, Q_5, Q_4, Q_3, Q_2, Q_1, Q_0) = (1, 1, 1, 1, 1, 4, 9, 12).$$

Додатково обчислено ексцентриситети вершин, що утворюють симплекси у симпліціальному комплексу K_{V_Y} (табл. 4.11), що відображають віддаленість кожного симплексу від решти структури.

Таблиця 4.11 – Ексцентриситети елементів комплексу K_{V_Y}

Ексцентриситет	Значення
$\text{ecc}(V1. \text{State of the tunnel (5)})$	1
$\text{ecc}(V10. \text{Economic consequences})$	0
$\text{ecc}(V11. \text{Consequences for life})$	∞
$\text{ecc}(V12. \text{The number of injured})$	1
$\text{ecc}(V15. \text{Level of damage})$	7
$\text{ecc}(V16. \text{Material damage})$	∞
$\text{ecc}(V17. \text{Geotechnology of construction})$	∞
$\text{ecc}(V18. \text{Capacity of land routes})$	∞
$\text{ecc}(V19. \text{Population})$	1
$\text{ecc}(V2.1 \text{ Malicious intent : Fighting, Terrorism})$	1
$\text{ecc}(V20. \text{Intensity of movement})$	0
$\text{ecc}(V21. \text{Average speed})$	∞
$\text{ecc}(V22. \text{Underground vibrations})$	∞
$\text{ecc}(V23. \text{Atmospheric pollution})$	0
$\text{ecc}(V24. \text{Flooding})$	0
$\text{ecc}(V6. \text{The scale of the impact of an undesirable event})$	∞
$\text{ecc}(V7. \text{Ability to function})$	2
$\text{ecc}(V8. \text{Time to restore functioning})$	2
$\text{ecc}(V9. \text{Environmental consequences})$	0
$\text{ecc}(V13. \text{Organizational, technical, etc. capabilities})$	∞
$\text{ecc}(V15.1. \text{Integrity of the system})$	0
$\text{ecc}(V2.2. \text{Without malice})$	0
$\text{ecc}(V3.1. \text{Technical})$	0
$\text{ecc}(V3.2. \text{Technological})$	0
$\text{ecc}(V4.1. \text{Shifts})$	2

Як показує аналіз, вісім вершин мають значення ексцентриситету ∞ , що відповідає їхній ізольованості в межах комплексу. Це вказує на нецілісну структуру K_{V_Y} та обмеження щодо зв'язності й керованості системи.

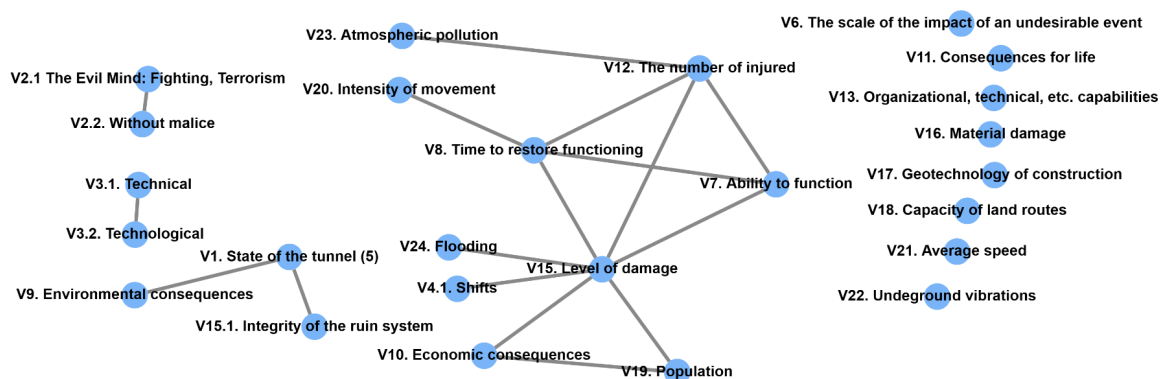
Побудуємо дуальний симпліціальний комплекс K_{V_X} . Симплекси, що входять в K_{V_X} наведено в таблиці 4.12, графічне представлення K_{V_X} наведено на рисунку 4.11.

Таблиця 4.12 – Симпліціальний комплекс K_{V_X}

Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_0^{V1}	State of the tunnel (5)	V6. The scale of the impact of an undesirable event
σ_0^{V10}	Economic consequences	V16. Material damage
σ_0^{V11}	Consequences for life	V19. Population
σ_0^{V12}	The number of injured	V11. Consequences for life
σ_0^{V14}	Investor	V17. Geotechnology of construction
σ_1^{V15}	Level of damage	V1. State of the tunnel (5), V9. Environmental consequences
σ_0^{V16}	Material damage	V13. Organizational, technical, etc. capabilities
σ_1^{V17}	Geotechnology of construction	V1. State of the tunnel (5), V15.1. Integrity of the system
σ_1^{V18}	Capacity of land routes	V20. Intensity of movement, V8. Time to restore functioning
σ_0^{V19}	Population	V18. Capacity of land routes
σ_1^{V2}	Anthropogenic activities	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice
$\sigma_1^{V2.1}$	Malicious intent: Fighting, Terrorism	V15. Level of damage, V4.1. Shifts
σ_0^{V20}	Intensity of movement	V21. Average speed
σ_0^{V21}	Average speed	V22. Underground vibrations
σ_0^{V22}	Underground vibrations	V4.1. Shifts
σ_0^{V23}	Atmospheric pollution	V11. Consequences for life
σ_3^{V24}	Flooding	V12. The number of injured, V15. Level of damage, V7. Ability to function, V8. Time to restore functioning

Таблиця 4.12 – (продовження)

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_1^{V3}	Technogenic events	V3.1. Technical, V3.2. Technological
σ_0^{V4}	Natural disasters, weather catastrophes	V4.1. Shifts
σ_0^{V5}	Protection of the object	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism
σ_0^{V6}	The scale of the impact of an undesirable event	V7. Ability to function
σ_2^{V7}	Ability to function	V10. Economic consequences, V15. Level of damage, V19. Population
σ_0^{V8}	Time to restore functioning	V7. Ability to function
σ_1^{V9}	Environmental consequences	V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution
σ_0^{V13}	Organizational, technical, etc. capabilities	V8. Time to restore functioning
$\sigma_0^{V15.1}$	Integrity of the system	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V2.2}$	Without malice	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V3.1}$	Technical	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V3.2}$	Technological	V15. Level of damage
$\sigma_1^{V4.1}$	Shifts	V15. Level of damage, V24. Flooding

Рис. 4.11 – Симпліціальний комплекс K_{V_X}

Симпліціальний комплекс K_{V_X} містить один 3-вимірний симплекс — σ_3^{V24} , один 2-вимірний симплекс — σ_2^{V7} , вісім 1-вимірних симплексів — σ_1^{V2} , $\sigma_1^{V2.1}$, σ_1^{V3} , $\sigma_1^{V4.1}$, σ_1^{V9} , σ_1^{V15} , σ_1^{V17} , σ_1^{V18} , двадцять 0-вимірних симплексів — σ_0^{V1} , $\sigma_0^{V2.2}$, $\sigma_0^{V3.1}$, $\sigma_0^{V3.2}$, σ_0^{V4} , σ_0^{V23} , σ_0^{V5} , σ_0^{V6} , σ_0^{V8} , σ_0^{V10} , σ_0^{V11} , σ_0^{V12} , σ_0^{V13} , σ_0^{V14} , $\sigma_0^{V15.1}$, σ_0^{V16} , σ_0^{V19} , σ_0^{V20} , σ_0^{V21} , σ_0^{V22} .

Аналіз структури K_{V_X} виявляє фрагментацію системи. Нескінченні ексцентриситети вказують на ізолювані компоненти.

Найінформативнішим симплексом є σ_3^{V24} , сформований вершиною V24 (Flooding), який об'єднує 4 вершини. Вилучення вершини V24 призводило б до зміни структури системи.

Перейдемо до q -аналізу симпліціального комплексу K_{V_X} . Розбиття на q -зв'язні компоненти наведено в табл. 4.13.

Таблиця 4.13 – Аналіз q -зв'язності для симпліціального комплексу K_{V_X}

q	N	Вершини
3	1	{V24. Flooding}
2	2	{V7. Ability to function}, {V24. Flooding}
1	10	{V2. Anthropogenic activities}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V3. Technogenic events}, {V4.1. Shifts}, {V7. Ability to function}, {V9. Environmental consequences}, {V15. Level of damage}, {V17. Geotechnology of construction}, {V18. Capacity of land routes}, {V24. Flooding}

Таблиця 4.13 – (продовження)

q	N	Вершини
0	12	{V1. State of the tunnel (5)}, {V2. Anthropogenic activities, V5. Protection of the object}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V24. Flooding, V18. Capacity of land routes, V13. Organizational, technical, etc. capabilities, V15.1. Integrity of the system, V7. Ability to function, V11. Consequences for life, V4.1. Shifts, V3.2. Technological, V3.1. Technical, V2.2. Without malice, V9. Environmental consequences, V8. Time to restore functioning, V6. The scale of the impact of an undesirable event, V22. Underground vibrations, V4. Natural disasters, weather catastrophes}, {V3. Technogenic events}, {V23. Atmospheric pollution, V12. The number of injured}, {V10. Economic consequences}, {V14. Investor}, {V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction}, {V16. Material damage}, {V19. Population}, {V20. Intensity of movement}, {V21. Average speed}

Результати q -аналізу для K_{V_X} показують, що максимальний рівень зв'язності досягається для $q_{\max} = 3$ існує лише одна q -зв'язна компонента, яка складається з симплексу σ_3^{V24} . Для $q = 2$ комплекс розпадається на 2 окремі

компоненти, що свідчить про зниження щільності зв'язків. Для $q = 1$ комплекс розпадається на 10 компонент.

Структурний (Q-)вектор комплексу K_{V_X} має вигляд:

$$\mathbf{Q}(K_{V_X}) = (Q_3, Q_2, Q_1, Q_0) = (1, 2, 10, 12).$$

Додатково обчислено ексцентриситети вершин, що утворюють симплекси у симпліціальному комплексу K_{V_X} (табл. 4.14), що відображають віддаленість кожного симплексу від решти структури.

Таблиця 4.14 – Ексцентриситети елементів комплексу K_{V_X}

Ексцентриситет	Значення
$\text{ecc}(V1. \textit{State of the tunnel (5)})$	∞
$\text{ecc}(V10. \textit{Economic consequences})$	∞
$\text{ecc}(V11. \textit{Consequences for life})$	0
$\text{ecc}(V12. \textit{The number of injured})$	0
$\text{ecc}(V14. \textit{Investor})$	∞
$\text{ecc}(V15. \textit{Level of damage})$	1
$\text{ecc}(V16. \textit{Material damage})$	∞
$\text{ecc}(V17. \textit{Geotechnology of construction})$	1
$\text{ecc}(V18. \textit{Capacity of land routes})$	1
$\text{ecc}(V19. \textit{Population})$	∞
$\text{ecc}(V2. \textit{Anthropogenic activities})$	1
$\text{ecc}(V2.1 \textit{ Malicious intent : Fighting, Terrorism})$	1
$\text{ecc}(V20. \textit{Intensity of movement})$	∞
$\text{ecc}(V21. \textit{Average speed})$	∞
$\text{ecc}(V22. \textit{Underground vibrations})$	0
$\text{ecc}(V23. \textit{Atmospheric pollution})$	0
$\text{ecc}(V24. \textit{Flooding})$	3
$\text{ecc}(V3. \textit{Technogenic events})$	∞
$\text{ecc}(V4. \textit{Natural disasters, weather catastrophes})$	0
$\text{ecc}(V5. \textit{Protection of the object})$	0
$\text{ecc}(V6. \textit{The scale of the impact of an undesirable event})$	0

Таблиця 4.14 – (продовження)

Ексцентриситет	Значення
$ecc(V7. Ability\ to\ function)$	2
$ecc(V8. Time\ to\ restore\ functioning)$	0
$ecc(V9. Environmental\ consequences)$	1
$ecc(V13. Organizational,\ technical,\ etc.\ capabilities)$	0
$ecc(V15.1. Integrity\ of\ the\ system)$	0
$ecc(V2.2. Without\ malice)$	0
$ecc(V3.1. Technical)$	0
$ecc(V3.2. Technological)$	0
$ecc(V4.1. Shifts)$	1

Як показує аналіз, вісім вершин мають значення ексцентриситету ∞ , що відповідає їхній ізольованості в межах комплексу. Це вказує на нецілісну структуру K_{V_X} та обмеження щодо зв'язності й керованості системи.

Використання симпліціального аналізу дозволило виявити елементи структури, що повністю ізольовані від управління системою (ті, що мають значення $ecc = \infty$) в когнітивних картах тунелів 1 і 5, що свідчить, що дані карти не є структурно цілісними. Для приведення до структурної цілісності, дані вершини будуть вилучені з когнітивної карти, якщо вони не є важливими для подальшого аналізу елементами. Якщо дані елементи грають важливу роль для подальшого аналізу, необхідно роздивитися, на які елементи дані вершини мають мати вплив (у випадку, коли $ecc = \infty$ у симпліціальному комплексі K_{V_X}), або які інші елементи мають вплив на проблемну вершину (у випадку, коли $ecc = \infty$ у симпліціальному комплексі K_{V_Y}). Результати аналізу даного підрозділу буде застосовано, при приведенні когнітивних карт тунелів 1 і 5 до структурної стійкості.

4.9 Пошук та аналіз спільнот і модулярності

Для обґрунтування кількісних вагових характеристик залучається пошук та аналіз спільнот і модулярності, що було представлено в підрозділі 3.2.

4.9.1 Пошук та аналіз спільнот і модулярності тунеля 1

Проведемо пошук спільнот та обчислення модулярності для когнітивної карти тунелю 1, використовуючи методи, що було представлено в підрозділі 3.3. Отримані результати представлено на рисунку 4.12.

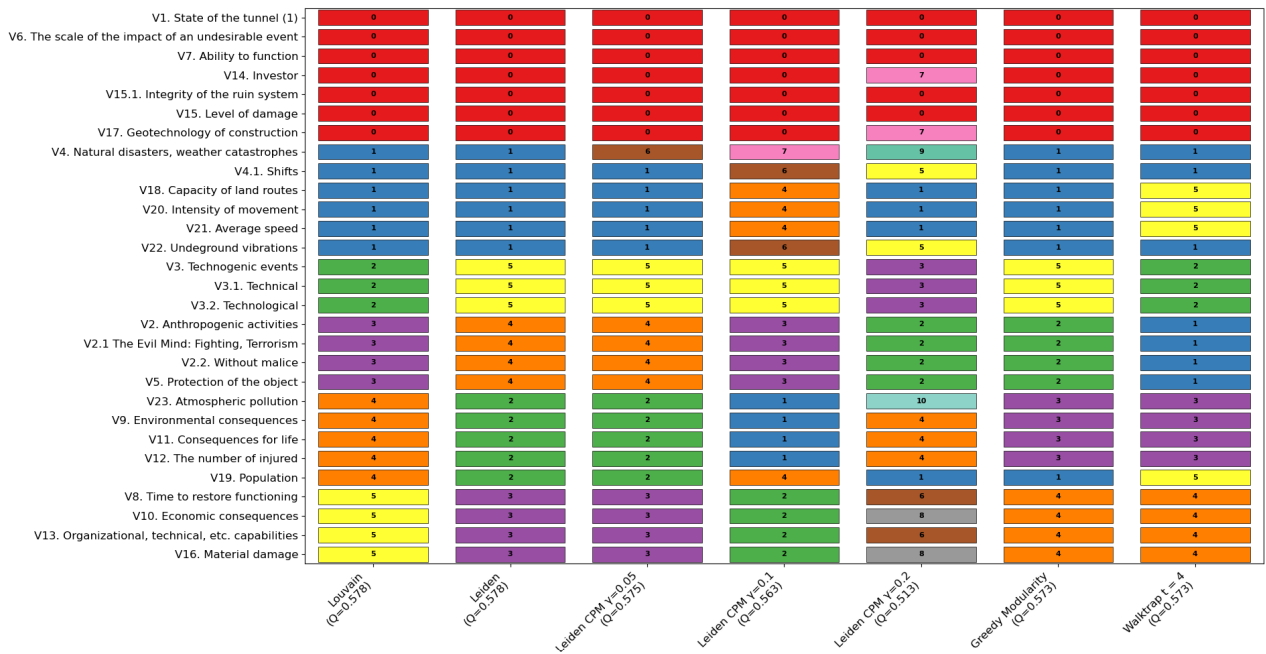


Рис. 4.12 – Пошук та аналіз спільнот когнітивної карти тунелю 1

Проаналізуємо отримані результати. Для початку розглянемо результати пошуку спільнот, при якому було отримане максимальне значення модулярності. Такі результати було отримано використовуючи метод Лувена та метод Лейдена, якими було знайдено однакову множину спільнот. Детальна візуалізація даного набору спільнот зображена на рисунку 4.13. Повний перелік спільнот та їх внутрішню щільність ρ_{in} зазначено в таблиці 4.15.

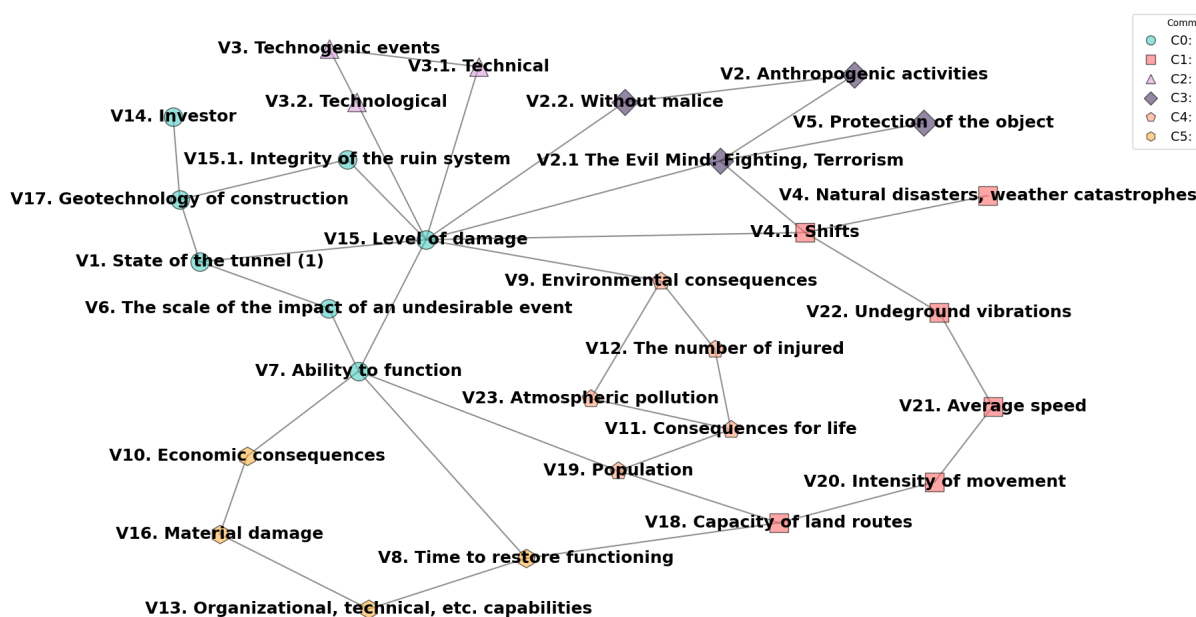


Рис. 4.13 – Візуалізація знайдених спільнот когнітивної карти тунелю 1

Таблиця 4.15 – Список спільнот когнітивної карти тунелю 1, що знайдено методами Лувена та Лейдена

Спільнота	Вершини спільноти	ρ_{in}
0	V1. State of the tunnel (1), V6. The scale of the impact of an undesirable event, V7. Ability to function, V14. Investor, V15.1. Integrity of the system, V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction	0.3190
1	V4. Natural disasters, weather catastrophes, V4.1. Shifts, V18. Capacity of land routes, V20. Intensity of movement, V21. Average speed, V22. Underground vibrations	0.2533
2	V3. Technogenic events, V3.1. Technical, V3.2. Technological	0.6667
3	V2. Anthropogenic activities, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V5. Protection of the object	0.4667
4	V23. Atmospheric pollution, V9. Environmental consequences, V11. Consequences for life, V12. The number of injured, V19. Population	0.3400
5	V8. Time to restore functioning, V10. Economic consequences, V13. Organizational, technical, etc. capabilities, V16. Material damage	0.3500

Набільшій уваги слід приділити спільноті 1, що має найнижче значення внутрішньої щільності ρ_{in} , та містить в собі вершини, що мають $ecc = \infty$ в хоча

б одному симпліціальному комплексу K_{V_Y} або K_{V_X} з результатів симпліціального аналізу, а саме V18, V20, V21, V22, що становить 4 з 6 вершин спільноти. Також, деякі вершини даної спільноти, не мають прямих залежностей, що суперечить структурній логіці когнітивної карти. Наприклад вершини V22. Underground vibrations та V18. Capacity of land routes не мають сильного взаємозв'язку і не мають бути в межах однієї спільноти, що може свідчити про недостовірні кількісні характеристики (ваги) в межах спільноти, або структурні проблеми когнітивної карти (що підтверджується в тому числі результатами симпліціального аналізу та аналізом структурної стійкості). Іншим прикладом є спільнота 5, котра має критичну для оцінки наслідків небажаних подій вершину, а саме V8. Time to restore functioning. Як можна побачити з аналізу, в межах даної спільноти знаходяться організаційно/економічні впливи на час відновлення функціонування, проте важливі фактори, що мають високий вплив на час відновлення функціонування, такі як геотехнологія забудови, в даній спільноті немає, що так само може свідчити про проблеми з кількісними ваговими коефіцієнтами (як і їх відсутністю, якщо дані вершини не пов'язані).

Використання методів Leiden CPM дає можливість знайти спільноти без використання модулярності, як цільової функції. Важливим спостереженням є те, що для всіх моделей Leiden CPM вершину V4 було виключено зі спільноти 1, та винесено в окрему спільноту, що явно вказує на помилку в кількісних вагових характеристиках, оскільки група вершин V4. Natural disasters, weather catastrophes та V4.1. Shifts явно віднесені до однієї групи (іншим прикладом такої групи є спільнота 2, що складається з вершин V3. Technogenic events, V3.1. Technical, V3.2. Technological). При виключенні вершини V4 зі спільноти 1, утворюється нова спільнота з вершин V4.1. Shifts, V18. Capacity of land routes, V20. Intensity of movement, V21. Average speed, V22. Underground vibrations. Така спільнота має внутрішню щільність $\rho_{in} = 0.37$, що більше за значення внутрішньої щільності 0.2533 (як у випадку, коли вершина V4 належить спільноті 1). Таким чином, використання алгоритму Leiden CPM, що за рахунок своєї цільової функції

має пріоритет на максимізацію внутрішньої щільності спільнот, дає можливість оцінити, видалення яких вершин підвищує внутрішню щільність спільнот, навіть, якщо кінцеве значення модулярності нижче за рахунок вершин, що утворюють малі спільноти, в тому числі спільноти, що мають лише одну вершину.

4.9.2 Пошук та аналіз спільнот і модулярності тунеля 5

Перейдемо до пошуку та аналізу спільнот когнітивної карти тунелю 5. Результати, що отримано шляхом використання методів з підрозділу 3.3 представлено на рисунку 4.14.

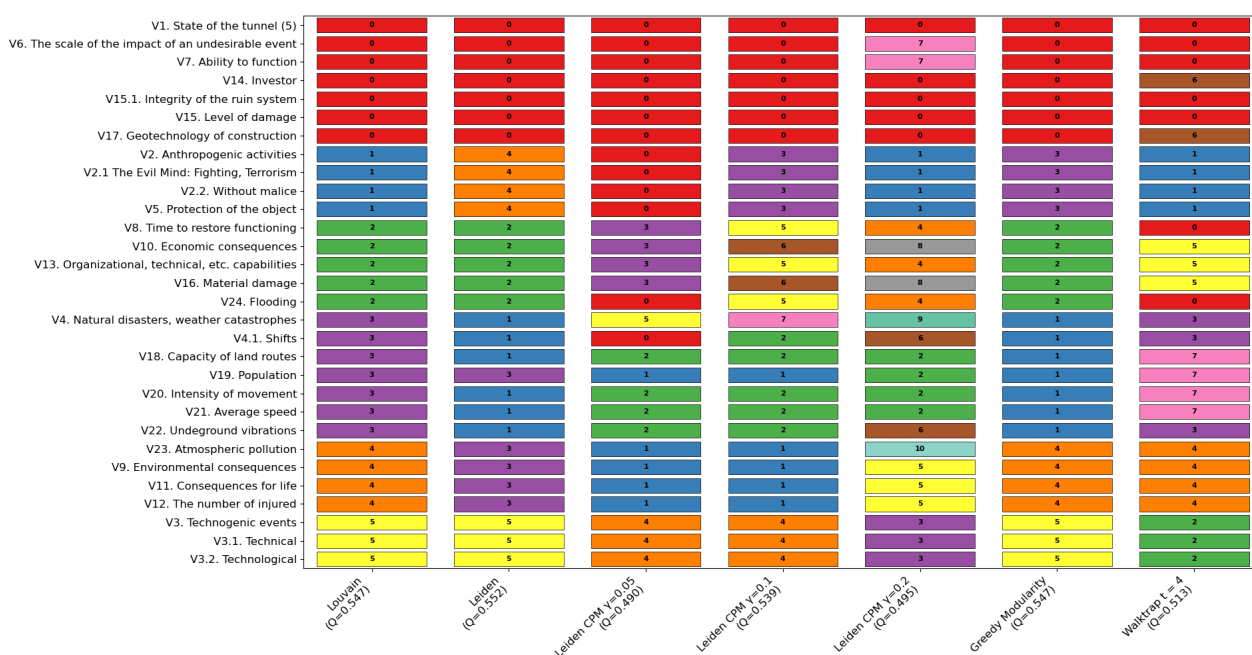


Рис. 4.14 – Пошук та аналіз спільнот когнітивної карти тунелю 5

Проаналізуємо отримані результати. Для початку розглянемо результати пошуку спільнот, при якому було отримане максимальне значення модулярності. Такі результати було отримано використовуючи метод Лейдена. Детальна візуалізація даного набору спільнот зображена на рисунку 4.15. Повний перелік знайдених спільнот та їх внутрішню щільність ρ_{in} зазначено в таблиці 4.16.

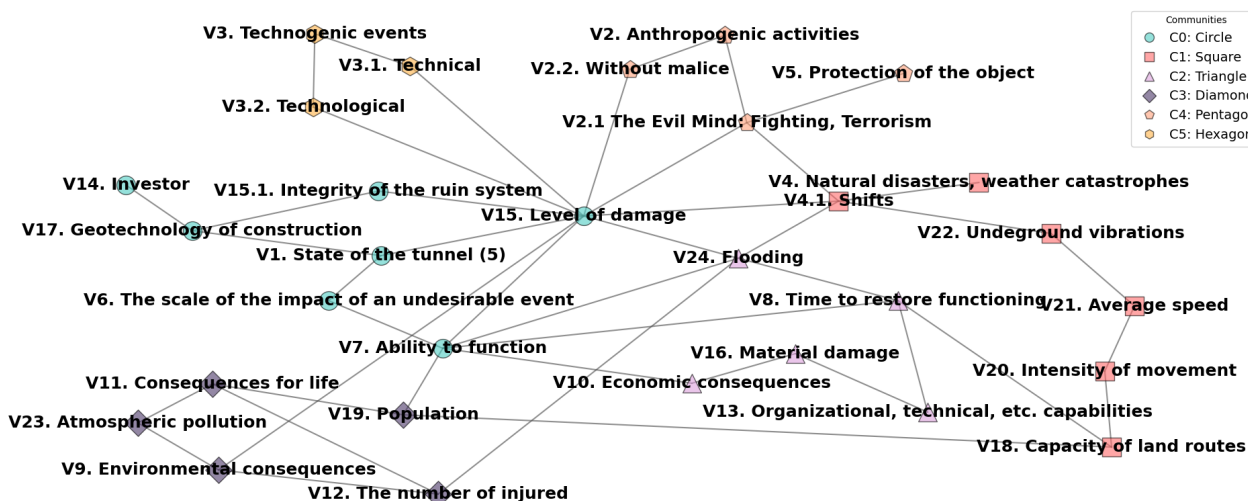


Рис. 4.15 – Візуалізація знайдених спільнот когнітивної карти тунелю 5

Таблиця 4.16 – Список спільнот когнітивної карти тунелю 5, що знайдено методом Лейдена

Спільнота	Вершини спільноти	ρ_{in}
0	V1. State of the tunnel (5), V6. The scale of the impact of an undesirable event, V7. Ability to function, V14. Investor, V15.1. Integrity of the system, V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction	0.3190
1	V4. Natural disasters, weather catastrophes, V4.1. Shifts, V18. Capacity of land routes, V20. Intensity of movement, V21. Average speed, V22. Underground vibrations	0.2533
2	V8. Time to restore functioning, V10. Economic consequences, V13. Organizational, technical, etc. capabilities, V16. Material damage, V24. Flooding	0.2600
3	V23. Atmospheric pollution, V9. Environmental consequences, V11. Consequences for life, V12. The number of injured, V19. Population	0.3400
4	V2. Anthropogenic activities, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V5. Protection of the object	0.4667
5	V3. Technogenic events, V3.1. Technical, V3.2. Technological	0.6667

Найбільшої уваги слід приділити спільноті 1, що має найнижче значення внутрішньої щільності $\rho_{in} = 0.2533$, та містить вершини V18, V20, V21, V22, які мають $ecc = \infty$ в хоча б одному симпліціальному комплексі K_{V_Y} або

K_{V_X} за результатами симпліціального аналізу. Дана спільнота є ідентичною до спільноти 1 когнітивної карти тунелю 1, що свідчить про спільні структурні проблеми обох когнітивних карт у цій підсистемі. Аналогічно до тунелю 1, вершини V22. Underground vibrations та V18. Capacity of land routes не мають сильного взаємозв'язку і не повинні перебувати в межах однієї спільноти, що може свідчити про недостовірні кількісні характеристики (ваги) або структурні проблеми когнітивної карти.

Суттєвою відмінністю когнітивної карти тунелю 5 від тунелю 1 є спільнота 2, що містить вершину V24. Flooding, яка відсутня в когнітивній карті тунелю 1. Включення даної вершини до спільноти з V8. Time to restore functioning, V10. Economic consequences, V13. Organizational, technical, etc. capabilities та V16. Material damage призводить до зниження внутрішньої щільності спільноти до значення $\rho_{in} = 0.26$, що є нижчим за аналогічну спільноту тунелю 1 ($\rho_{in} = 0.35$). Це може вказувати на недостатню обґрунтованість вагових коефіцієнтів зв'язків вершини V24 з іншими вершинами спільноти.

Спільноти 4 та 5, що відповідають групам антропогенних та техногенних факторів, мають ідентичну структуру та значення внутрішньої щільності ($\rho_{in} = 0.4667$ та $\rho_{in} = 0.6667$ відповідно) порівняно з когнітивною картою тунелю 1, що підтверджує коректність моделювання цих підсистем в обох когнітивних картах.

Використання методу Leiden CPM ($\gamma = 0.2$) дозволяє провести більш детальний аналіз структури спільнот. Результати застосування даного методу представлено в таблиці 4.17.

Таблиця 4.17 – Список спільнот когнітивної карти тунелю 5, що знайдено методом Leiden CPM ($\gamma = 0.2$)

Спільнота	Вершини спільноти	ρ_{in}
0	V1. State of the tunnel (5), V14. Investor, V15.1. Integrity of the system, V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction	0.4400

Таблиця 4.17 – (продовження)

Спіль- нота	Вершини спільноти	ρ_{in}
1	V2. Anthropogenic activities, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V5. Protection of the object	0.4667
2	V18. Capacity of land routes, V19. Population, V20. Intensity of movement, V21. Average speed	0.4833
3	V3. Technogenic events, V3.1. Technical, V3.2. Technological	0.6667
4	V8. Time to restore functioning, V13. Organizational, technical, etc. capabilities, V24. Flooding	0.3667
5	V9. Environmental consequences, V11. Consequences for life, V12. The number of injured	0.6667
6	V4.1. Shifts, V22. Underground vibrations	0.9000
7	V6. The scale of the impact of an undesirable event, V7. Ability to function	0.8000
8	V10. Economic consequences, V16. Material damage	1.0000
9	V4. Natural disasters, weather catastrophes	0.0000
10	V23. Atmospheric pollution	0.0000

Аналогічно до результатів для когнітивної карти тунелю 1, метод Leiden CPM виокремлює вершину V4. Natural disasters, weather catastrophes в окрему спільноту 9, що явно вказує на проблеми з кількісними ваговими характеристиками зв'язку між V4 та V4.1. Shifts. Водночас, вершини V4.1 та V22. Underground vibrations формують спільноту 6 з високою внутрішньою щільністю $\rho_{in} = 0.9$, що підтверджує наявність сильного зв'язку між цими вершинами.

Важливим спостереженням є формування спільноти 2, що містить вершини V18, V19, V20, V21 з внутрішньою щільністю $\rho_{in} = 0.4833$. Порівняно з результатами методу Лейдена (спільнота 1 з $\rho_{in} = 0.2533$), виключення вершин V4, V4.1 та V22 суттєво підвищує внутрішню щільність, що свідчить про більш однорідну структуру транспортних характеристик (пропускна здатність, інтенсивність руху, середня швидкість) та їх зв'язок з населенням.

Спільнота 8 (V10. Economic consequences, V16. Material damage) має максимальну внутрішню щільність $\rho_{in} = 1$, що вказує на повний зв'язок між

економічними наслідками та матеріальними збитками. Аналогічно, спільнота 7 (V6, V7) з $\rho_{in} = 0.8$ демонструє сильний зв'язок між масштабом впливу небажаної події та здатністю функціонувати.

Виокремлення V4 та V23 в окремі спільноти — є спільними для обох когнітивних карт та потребують перегляду вагових коефіцієнтів відповідних зв'язків.

4.10 Перебудова когнітивної карти тунелів 1 і 5 з врахуванням результатів симпліціального аналізу та аналізу спільнот

Враховуючи структурні недоліки когнітивної карти, що було виявлено методами симпліціального аналізу, було проведено аналіз елементів, що повністю ізольовані від системи в межах відповідних комплексів, та аналіз симплексів, що не інтегровані в загальну структуру графу. Враховуючи результати пошуку та аналізу спільнот і модулярності, було скореговано вагові коефіцієнти між вершинами, що мають нелажати одній спільноті згідно з визначенням карти (до таких множин належать вершини з префіксами V2, V3, V4, V15). В результаті отримано нові когнітивні карти тунелів 1 і 5, що представлено на рисунках 4.16 і 4.17 відповідно.

Оскільки структуру когнітивних карти було змінено, необхідно провести всі процедури побудови когнітивних моделей. Спочатку, перевіримо, що нова карта структурно цілісна використовуючи процедури симпліціального аналізу.

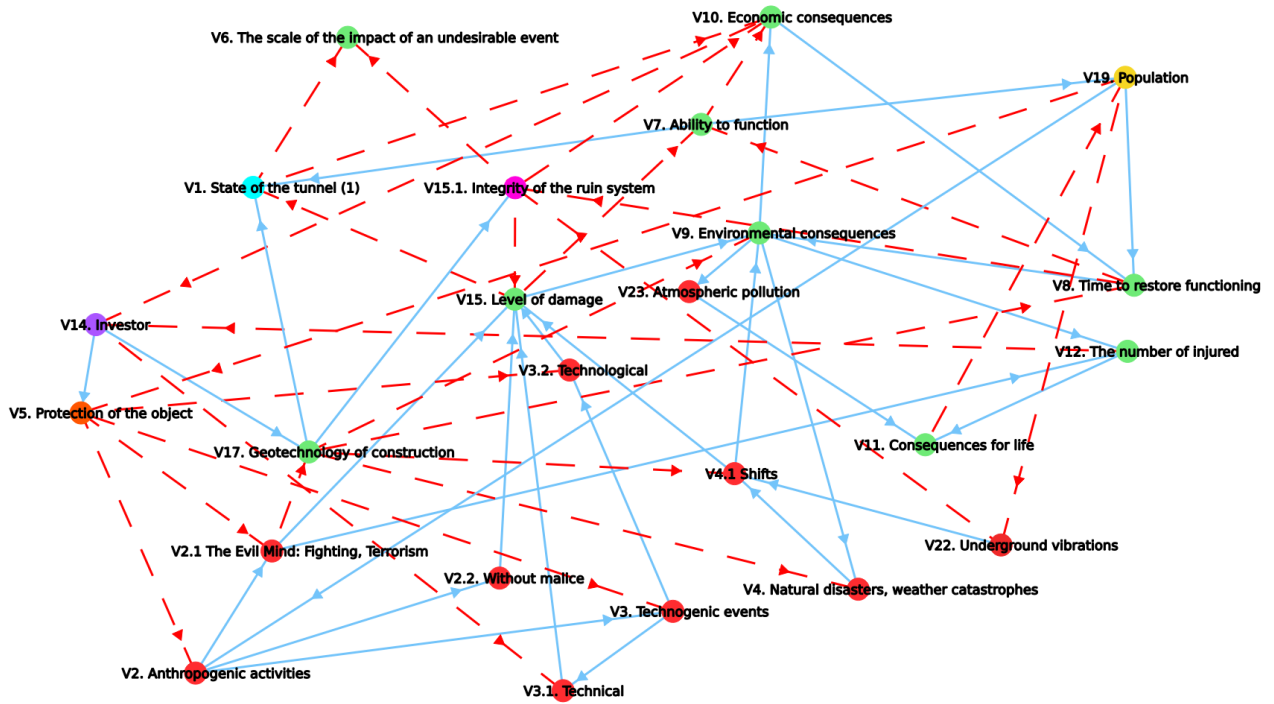


Рис. 4.16 – Когнітивна карта тунелю 1 після перебудови з врахуванням симпліціального аналізу та аналізу спільнот

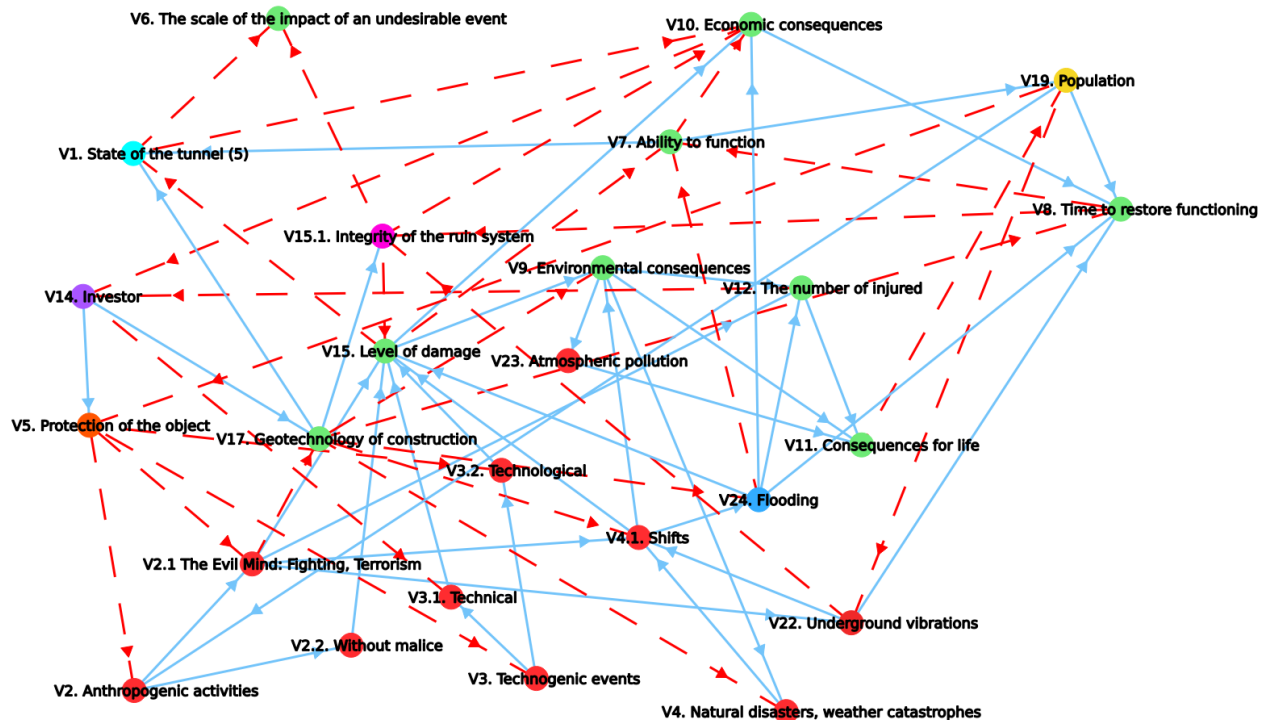


Рис. 4.17 – Когнітивна карта тунелю 5 після перебудови з врахуванням симпліціального аналізу та аналізу спільнот

4.11 Обґрунтування структурної цілісності перебудованих когнітивних карт

4.11.1 Обґрунтування структурної цілісності нової когнітивної карти тунеля 1

Побудуємо примальний симпліціальний комплекс K_{V_Y} . Симплекси, що входять в K_{V_Y} наведено в таблиці 4.18, графічне представлення K_{V_Y} наведено на рисунку 4.18.

Таблиця 4.18 – Симпліціальний комплекс K_{V_Y}

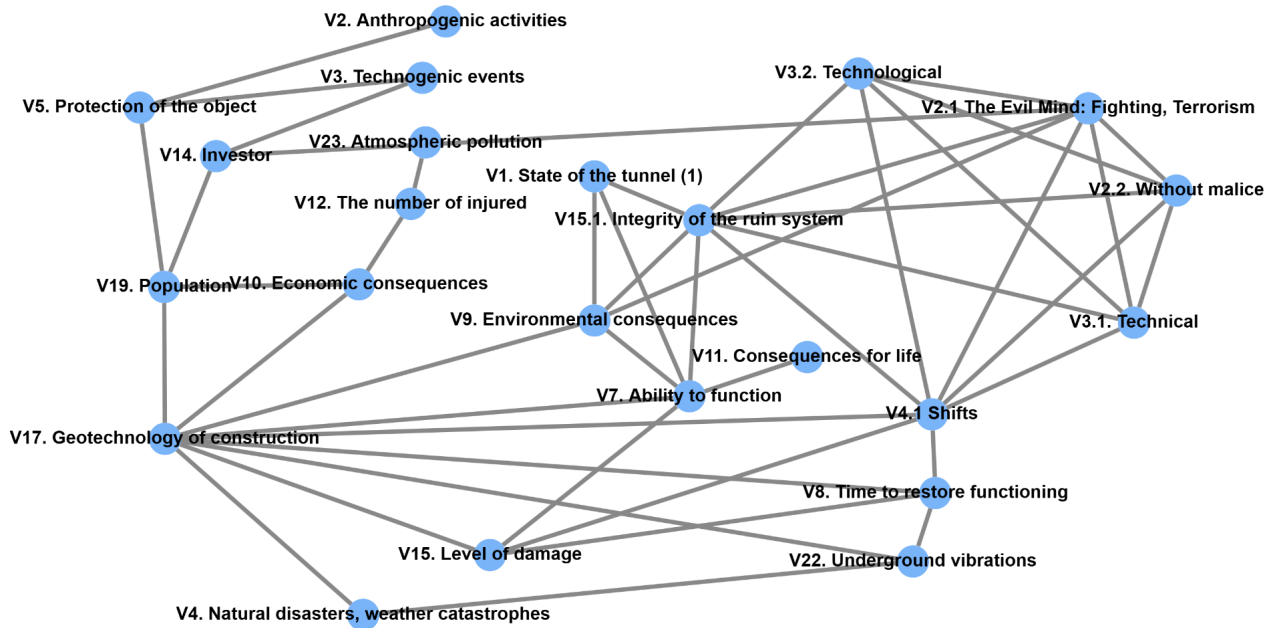
Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_2^{V1}	State of the tunnel (1)	V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction, V7. Ability to function
σ_3^{V10}	Economic consequences	V1. State of the tunnel (1), V15.1. Integrity of the system, V7. Ability to function, V9. Environmental consequences
σ_1^{V11}	Consequences for life	V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution
σ_1^{V12}	The number of injured	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V9. Environmental consequences
σ_1^{V14}	Investor	V10. Economic consequences, V12. The number of injured
σ_5^{V15}	Level of damage	V15.1. Integrity of the system, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V3.1. Technical, V3.2. Technological, V4.1 Shifts
σ_1^{V17}	Geotechnology of construction	V14. Investor, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism

Таблиця 4.18 – (продовження)

Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_1^{V19}	Population	V11. Consequences for life, V7. Ability to function
σ_1^{V2}	Anthropogenic activities	V19. Population, V5. Protection of the object
$\sigma_1^{V2.1}$	Malicious intent: Fighting, Terrorism	V2. Anthropogenic activities, V5. Protection of the object
σ_0^{V22}	Underground vibrations	V19. Population
σ_0^{V23}	Atmospheric pollution	V9. Environmental consequences
σ_1^{V3}	Technogenic events	V2. Anthropogenic activities, V5. Protection of the object
σ_1^{V4}	Natural disasters, weather catastrophes	V17. Geotechnology of construction, V9. Environmental consequences
$\sigma_2^{V4.1}$	Shifts	V17. Geotechnology of construction, V22. Underground vibrations, V4. Natural disasters, weather catastrophes
σ_1^{V5}	Protection of the object	V14. Investor, V19. Population
σ_1^{V6}	The scale of the impact of an undesirable event	V1. State of the tunnel (1), V15.1. Integrity of the system
σ_1^{V7}	Ability to function	V15. Level of damage, V8. Time to restore functioning
σ_2^{V8}	Time to restore functioning	V10. Economic consequences, V17. Geotechnology of construction, V19. Population
σ_3^{V9}	Environmental consequences	V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction, V4.1 Shifts, V8. Time to restore functioning

Таблиця 4.18 – (продовження)

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
$\sigma_2^{V15.1}$	Integrity of the system	V17. Geotechnology of construction, V22. Underground vibrations, V8. Time to restore functioning
$\sigma_0^{V2.2}$	Without malice	V2. Anthropogenic activities
$\sigma_1^{V3.1}$	Technical	V14. Investor, V3. Technogenic events
$\sigma_1^{V3.2}$	Technological	V3. Technogenic events, V5. Protection of the object

Рис. 4.18 – Симпліціальний комплекс K_{V_Y} тунеля 1 після перебудови когнітивної карти

Симпліціальний комплекс K_{V_Y} містить один 5-вимірний симплекс — σ_5^{V15} , два 3-вимірні симплекси — σ_3^{V9} та σ_3^{V10} , чотири 2-вимірні симплекси — σ_2^{V1} , $\sigma_2^{V4.1}$, σ_2^{V8} та $\sigma_2^{V15.1}$, чотирнадцять 1-вимірних симплексів — σ_1^{V2} , $\sigma_1^{V2.1}$, σ_1^{V3} , $\sigma_1^{V3.1}$, $\sigma_1^{V3.2}$, σ_1^{V4} , σ_1^{V5} , σ_1^{V6} , σ_1^{V7} , σ_1^{V11} , σ_1^{V12} , σ_1^{V14} , σ_1^{V17} , σ_1^{V19} , три 0-вимірні симплекси — $\sigma_0^{V2.2}$, σ_0^{V23} та σ_0^{V22} .

Аналіз структури K_{V_Y} підтверджує структурну цілісність системи. Відсутність ізольованих вершин та компонент свідчить про достатню зв'язність, що забезпечує можливість керування всіма елементами системи.

Найінформативнішим симплексом є σ_5^{V15} , сформований вершиною V15 (Level of damage), який об'єднує 6 вершин. Вилучення вершини V15 призводило б до зміни структури системи.

Перейдемо до q -аналізу симпліціального комплексу K_{V_Y} . Розбиття на q -зв'язні компоненти наведено в табл. 4.19.

Таблиця 4.19 – Аналіз q -зв'язності для симпліціального комплексу K_{V_Y}

q	N	Вершини
5	1	{V15. Level of damage}
4	1	{V15. Level of damage}
3	3	{V9. Environmental consequences}, {V10. Economic consequences}, {V15. Level of damage}
2	7	{V1. State of the tunnel (1)}, {V4.1 Shifts}, {V8. Time to restore functioning}, {V9. Environmental consequences}, {V10. Economic consequences}, {V15.1. Integrity of the system}, {V15. Level of damage}
1	15	{V1. State of the tunnel (1), V9. Environmental consequences, V15.1. Integrity of the system, V4.1 Shifts, V7. Ability to function}, {V2. Anthropogenic activities}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V3. Technogenic events}, {V3.1. Technical}, {V3.2. Technological},

Таблиця 4.19 – (продовження)

q	N	Вершини
		{V4. Natural disasters, weather catastrophes}, {V5. Protection of the object}, {V6. The scale of the impact of an undesirable event, V10. Economic consequences}, {V8. Time to restore functioning}, {V11. Consequences for life}, {V12. The number of injured}, {V14. Investor}, {V15. Level of damage}, {V17. Geotechnology of construction}, {V19. Population}
0	1	{V1. State of the tunnel (1), V19. Population, V10. Economic consequences, V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction, V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution, V4. Natural disasters, weather catastrophes, V15.1. Integrity of the system, V9. Environmental consequences, V8. Time to restore functioning, V22. Underground vibrations, V5. Protection of the object, V3.1. Technical, V3.2. Technological, V3. Technogenic events, V2.2. Without malice, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2. Anthropogenic activities, V14. Investor, V11. Consequences for life, V4.1 Shifts, V7. Ability to function, V6. The scale of the impact of an undesirable event}

Результати q -аналізу для K_{V_Y} показують, що максимальний рівень зв'язності досягається для $q_{\max} = 5$, і на рівнях $q = 5$, $q = 4$, $q = 0$ існує лише одна q -зв'язна компонента, яка складається з симплексу σ_5^{V15} . Для $q = 3$ комплекс розпадається на 3 окремі компоненти, що свідчить про зниження щільності зв'язків. Для $q = 2$ комплекс розпадається на 7 компонент.

Структурний (Q-)вектор комплексу K_{V_Y} має вигляд:

$$\mathbf{Q}(K_{V_Y}) = (Q_5, Q_4, Q_3, Q_2, Q_1, Q_0) = (1, 1, 3, 7, 15, 1).$$

Додатково обчислено ексцентриситети вершин, що утворюють симплекси у симпліціальному комплексі K_{V_Y} (табл. 4.20), що відображають віддаленість кожного симплексу від решти структури.

Таблиця 4.20 – Ексцентриситети елементів комплексу K_{V_Y}

Ексцентриситет	Значення
$\text{ecc}(V1. \textit{State of the tunnel (1)})$	0.50
$\text{ecc}(V10. \textit{Economic consequences})$	1
$\text{ecc}(V11. \textit{Consequences for life})$	1
$\text{ecc}(V12. \textit{The number of injured})$	1
$\text{ecc}(V14. \textit{Investor})$	1
$\text{ecc}(V15. \textit{Level of damage})$	5
$\text{ecc}(V17. \textit{Geotechnology of construction})$	1
$\text{ecc}(V19. \textit{Population})$	1
$\text{ecc}(V2. \textit{Anthropogenic activities})$	1
$\text{ecc}(V2.1 \textit{ Malicious intent : Fighting, Terrorism})$	0
$\text{ecc}(V22. \textit{Underground vibrations})$	0
$\text{ecc}(V23. \textit{Atmospheric pollution})$	0
$\text{ecc}(V3. \textit{Technogenic events})$	0
$\text{ecc}(V4. \textit{Natural disasters, weather catastrophes})$	1
$\text{ecc}(V4.1 \textit{ Shifts})$	0.50
$\text{ecc}(V5. \textit{Protection of the object})$	1
$\text{ecc}(V6. \textit{The scale of the impact of an undesirable event})$	0
$\text{ecc}(V7. \textit{Ability to function})$	0
$\text{ecc}(V8. \textit{Time to restore functioning})$	2
$\text{ecc}(V9. \textit{Environmental consequences})$	1
$\text{ecc}(V15.1. \textit{Integrity of the system})$	0.50
$\text{ecc}(V2.2. \textit{Without malice})$	0
$\text{ecc}(V3.1. \textit{Technical})$	1
$\text{ecc}(V3.2. \textit{Technological})$	1

Усі вершини комплексу K_{V_Y} мають скінченні значення ексцентриситету, що підтверджує структурну цілісність системи. Відсутність ізольованих вершин

свідчить про достатню зв'язність та можливість ефективного керування всіма елементами.

Побудуємо дуальний симпліціальний комплекс K_{V_X} . Симплекси, що входять в K_{V_X} наведено в таблиці 4.21, графічне представлення K_{V_X} наведено на рисунку 4.19.

Таблиця 4.21 – Симпліціальний комплекс K_{V_X}

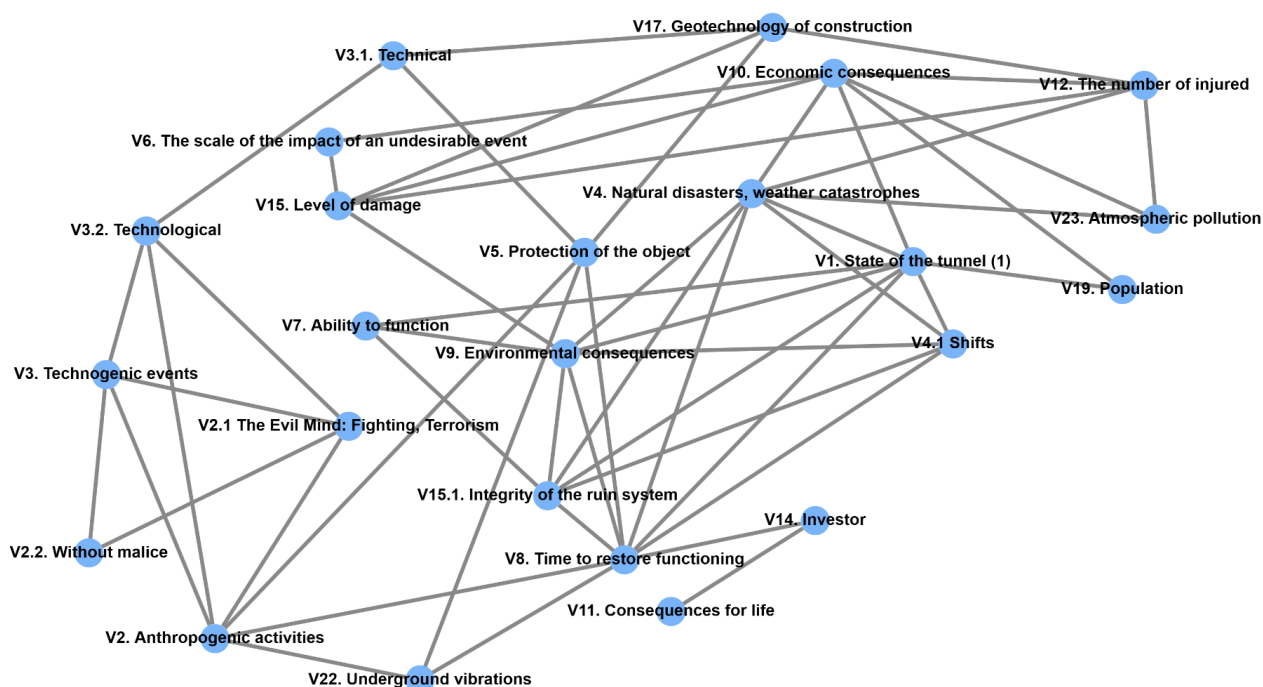
Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_1^{V1}	State of the tunnel (1)	V10. Economic consequences, V6. The scale of the impact of an undesirable event
σ_1^{V10}	Economic consequences	V14. Investor, V8. Time to restore functioning
σ_0^{V11}	Consequences for life	V19. Population
σ_1^{V12}	The number of injured	V11. Consequences for life, V14. Investor
σ_2^{V14}	Investor	V17. Geotechnology of construction, V3.1. Technical, V5. Protection of the object
σ_2^{V15}	Level of damage	V1. State of the tunnel (1), V7. Ability to function, V9. Environmental consequences
σ_5^{V17}	Geotechnology of construction	V1. State of the tunnel (1), V15.1. Integrity of the system, V4. Natural disasters, weather catastrophes, V4.1 Shifts, V8. Time to restore functioning, V9. Environmental consequences
σ_3^{V19}	Population	V2. Anthropogenic activities, V22. Underground vibrations, V5. Protection of the object, V8. Time to restore functioning

Таблиця 4.21 – (продовження)

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_2^{V2}	Anthropogenic activities	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V3. Technogenic events
$\sigma_2^{V2.1}$	Malicious intent: Fighting, Terrorism	V12. The number of injured, V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction
σ_1^{V22}	Underground vibrations	V15.1. Integrity of the system, V4.1 Shifts
σ_0^{V23}	Atmospheric pollution	V11. Consequences for life
σ_1^{V3}	Technogenic events	V3.1. Technical, V3.2. Technological
σ_0^{V4}	Natural disasters, weather catastrophes	V4.1 Shifts
$\sigma_1^{V4.1}$	Shifts	V15. Level of damage, V9. Environmental consequences
σ_3^{V5}	Protection of the object	V2. Anthropogenic activities, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V3. Technogenic events, V3.2. Technological
σ_{-1}^{V6}	The scale of the impact of an undesirable event	
σ_2^{V7}	Ability to function	V1. State of the tunnel (1), V10. Economic consequences, V19. Population
σ_2^{V8}	Time to restore functioning	V15.1. Integrity of the system, V7. Ability to function, V9. Environmental consequences
σ_3^{V9}	Environmental consequences	V10. Economic consequences, V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution, V4. Natural disasters, weather catastrophes

Таблиця 4.21 – (продовження)

Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
$\sigma_2^{V15.1}$	Integrity of the system	V10. Economic consequences, V15. Level of damage, V6. The scale of the impact of an undesirable event
$\sigma_0^{V2.2}$	Without malice	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V3.1}$	Technical	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V3.2}$	Technological	V15. Level of damage

Рис. 4.19 – Симпліціальний комплекс K_{V_X} тунелю 1 після перебудови когнітивної карти

Симпліціальний комплекс K_{V_X} містить один 5-вимірний симплекс — σ_5^{V17} , три 3-вимірні симплекси — σ_3^{V5} , σ_3^{V9} та σ_3^{V19} , сім 2-вимірних симплексів — σ_2^{V2} , $\sigma_2^{V2.1}$, σ_2^{V7} , σ_2^{V8} , σ_2^{V14} , $\sigma_2^{V15.1}$, σ_2^{V15} , шість 1-вимірних симплексів — σ_1^{V1} , σ_1^{V3} , $\sigma_1^{V4.1}$, σ_1^{V10} , σ_1^{V12} , σ_1^{V22} , шість 0-вимірних симплексів — $\sigma_0^{V2.2}$, $\sigma_0^{V3.1}$, $\sigma_0^{V3.2}$, σ_0^{V4} , σ_0^{V23} , σ_0^{V11} .

Крім того, K_{V_X} містить один порожній симплекс (тобто такий, що не містить вершин і має розмірність -1): σ_{-1}^{V6} .

Аналіз структури K_{V_X} підтверджує структурну цілісність системи. Відсутність ізольованих вершин та компонент свідчить про достатню зв'язність, що забезпечує можливість керування всіма елементами системи.

Найінформативнішим симплексом є σ_5^{V17} , сформований вершиною V17 (Geotechnology of construction), який об'єднує 6 вершин. Вилучення вершини V17 призводило б до зміни структури системи.

Перейдемо до q -аналізу симпліціального комплексу K_{V_X} . Розбиття на q -зв'язні компоненти наведено в табл. 4.22.

Таблиця 4.22 – Аналіз q -зв'язності для симпліціального комплексу K_{V_X}

q	N	Вершини
5	1	{V17. Geotechnology of construction}
4	1	{V17. Geotechnology of construction}
3	4	{V5. Protection of the object}, {V9. Environmental consequences}, {V17. Geotechnology of construction}, {V19. Population}
2	11	{V2. Anthropogenic activities}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V5. Protection of the object}, {V7. Ability to function}, {V8. Time to restore functioning}, {V9. Environmental consequences}, {V14. Investor}, {V15.1. Integrity of the system}, {V15. Level of damage}, {V17. Geotechnology of construction}, {V19. Population}

Таблиця 4.22 – (продовження)

q	N	Вершини
1	12	{V1. State of the tunnel (1), V15.1. Integrity of the system}, {V2. Anthropogenic activities, V5. Protection of the object}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V3. Technogenic events}, {V4.1 Shifts}, {V7. Ability to function}, {V8. Time to restore functioning}, V17. Geotechnology of construction, V22. Underground vibrations, V15. Level of damage}, {V9. Environmental consequences}, {V10. Economic consequences}, {V12. The number of injured}, {V14. Investor}, {V19. Population}
0	1	{V1. State of the tunnel (1), V15.1. Integrity of the system, V9. Environmental consequences, V17. Geotechnology of construction, V22. Underground vibrations, V8. Time to restore functioning, V15. Level of damage, V7. Ability to function, V11. Consequences for life, V4.1 Shifts, V3.2. Technological, V3.1. Technical, V2.2. Without malice, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V14. Investor, V19. Population, V10. Economic consequences, V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution, V5. Protection of the object, V3. Technogenic events, V2. Anthropogenic activities, V4. Natural disasters, weather catastrophes}

Результати q -аналізу для K_{V_X} показують, що максимальний рівень зв'язності досягається для $q_{\max} = 5$, і на рівнях $q = 5$, $q = 4$, $q = 0$ існує лише одна q -зв'язна компонента, яка складається з симплексу σ_5^{V17} . Для $q = 3$ комплекс розпадається на 4 окремі компоненти, що свідчить про зниження щільності зв'язків. Для $q = 2$ комплекс розпадається на 11 компонент.

Структурний (Q-)вектор комплексу K_{V_X} має вигляд:

$$\mathbf{Q}(K_{V_X}) = (Q_5, Q_4, Q_3, Q_2, Q_1, Q_0) = (1, 1, 4, 11, 12, 1).$$

Додатково обчислено ексцентриситети вершин, що утворюють симплекси у симпліціальному комплексу K_{V_X} (табл. 4.23), що відображають віддаленість кожного симплексу від решти структури.

Таблиця 4.23 – Ексцентриситети елементів комплексу K_{V_X}

Ексцентриситет	Значення
ecc (V1. <i>State of the tunnel</i> (1))	0
ecc (V10. <i>Economic consequences</i>)	1
ecc (V11. <i>Consequences for life</i>)	0
ecc (V12. <i>The number of injured</i>)	1
ecc (V14. <i>Investor</i>)	2
ecc (V15. <i>Level of damage</i>)	0.50
ecc (V17. <i>Geotechnology of construction</i>)	2
ecc (V19. <i>Population</i>)	3
ecc (V2. <i>Anthropogenic activities</i>)	0.50
ecc (V2.1 <i>Malicious intent : Fighting, Terrorism</i>)	2
ecc (V22. <i>Underground vibrations</i>)	0
ecc (V23. <i>Atmospheric pollution</i>)	0
ecc (V3. <i>Technogenic events</i>)	1
ecc (V4. <i>Natural disasters, weather catastrophes</i>)	0
ecc (V4.1 <i>Shifts</i>)	1
ecc (V5. <i>Protection of the object</i>)	1
ecc (V7. <i>Ability to function</i>)	2
ecc (V8. <i>Time to restore functioning</i>)	0.50
ecc (V9. <i>Environmental consequences</i>)	3
ecc (V15.1. <i>Integrity of the system</i>)	0.50
ecc (V2.2. <i>Without malice</i>)	0
ecc (V3.1. <i>Technical</i>)	0
ecc (V3.2. <i>Technological</i>)	0

Усі вершини комплексу K_{V_X} мають скінченні значення ексцентриситету, що підтверджує структурну цілісність системи. Відсутність ізольованих вершин свідчить про достатню зв'язність та можливість ефективного керування всіма елементами.

4.11.2 Обґрунтування структурної цілісності нової когнітивної карти тунеля 5

Побудуємо примальний симпліціальний комплекс K_{V_Y} . Симплекси, що входять в K_{V_Y} наведено в таблиці 4.24, графічне представлення K_{V_Y} наведено на рисунку 4.20.

Таблиця 4.24 – Симпліціальний комплекс K_{V_Y} нової когнітивної карти тунеля 5

Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_2^{V1}	State of the tunnel (5)	V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction, V7. Ability to function
σ_4^{V10}	Economic consequences	V1. State of the tunnel (5), V15. Level of damage, V15.1. Integrity of the system, V24. Flooding, V7. Ability to function
σ_2^{V11}	Consequences for life	V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution, V9. Environmental consequences
σ_2^{V12}	The number of injured	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V24. Flooding, V9. Environmental consequences
σ_1^{V14}	Investor	V10. Economic consequences, V12. The number of injured

Таблиця 4.24 – (продовження)

Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_6^{V15}	Level of damage	V15.1. Integrity of the system, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V24. Flooding, V3.1. Technical, V3.2. Technological, V4.1. Shifts
σ_1^{V17}	Geotechnology of construction	V14. Investor, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism
σ_1^{V19}	Population	V11. Consequences for life, V7. Ability to function
σ_1^{V2}	Anthropogenic activities	V19. Population, V5. Protection of the object
$\sigma_1^{V2.1}$	Malicious intent: Fighting, Terrorism	V2. Anthropogenic activities, V5. Protection of the object
σ_1^{V22}	Underground vibrations	V19. Population, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism
σ_0^{V23}	Atmospheric pollution	V9. Environmental consequences
σ_1^{V24}	Flooding	V17. Geotechnology of construction, V4.1. Shifts
σ_0^{V3}	Technogenic events	V5. Protection of the object
σ_1^{V4}	Natural disasters, weather catastrophes	V17. Geotechnology of construction, V9. Environmental consequences
σ_1^{V5}	Protection of the object	V14. Investor, V19. Population
σ_1^{V6}	The scale of the impact of an undesirable event	V1. State of the tunnel (5), V15.1. Integrity of the system
σ_2^{V7}	Ability to function	V15. Level of damage, V24. Flooding, V8. Time to restore functioning

Таблиця 4.24 – (продовження)

Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_4^{V8}	Time to restore functioning	V10. Economic consequences, V17. Geotechnology of construction, V19. Population, V22. Underground vibrations, V24. Flooding
σ_2^{V9}	Environmental consequences	V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction, V4.1. Shifts
$\sigma_2^{V15.1}$	Integrity of the system	V17. Geotechnology of construction, V22. Underground vibrations, V8. Time to restore functioning
$\sigma_0^{V2.2}$	Without malice	V2. Anthropogenic activities
$\sigma_1^{V3.1}$	Technical	V14. Investor, V3. Technogenic events
$\sigma_1^{V3.2}$	Technological	V3. Technogenic events, V5. Protection of the object
$\sigma_3^{V4.1}$	Shifts	V17. Geotechnology of construction, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V22. Underground vibrations, V4. Natural disasters, weather catastrophes

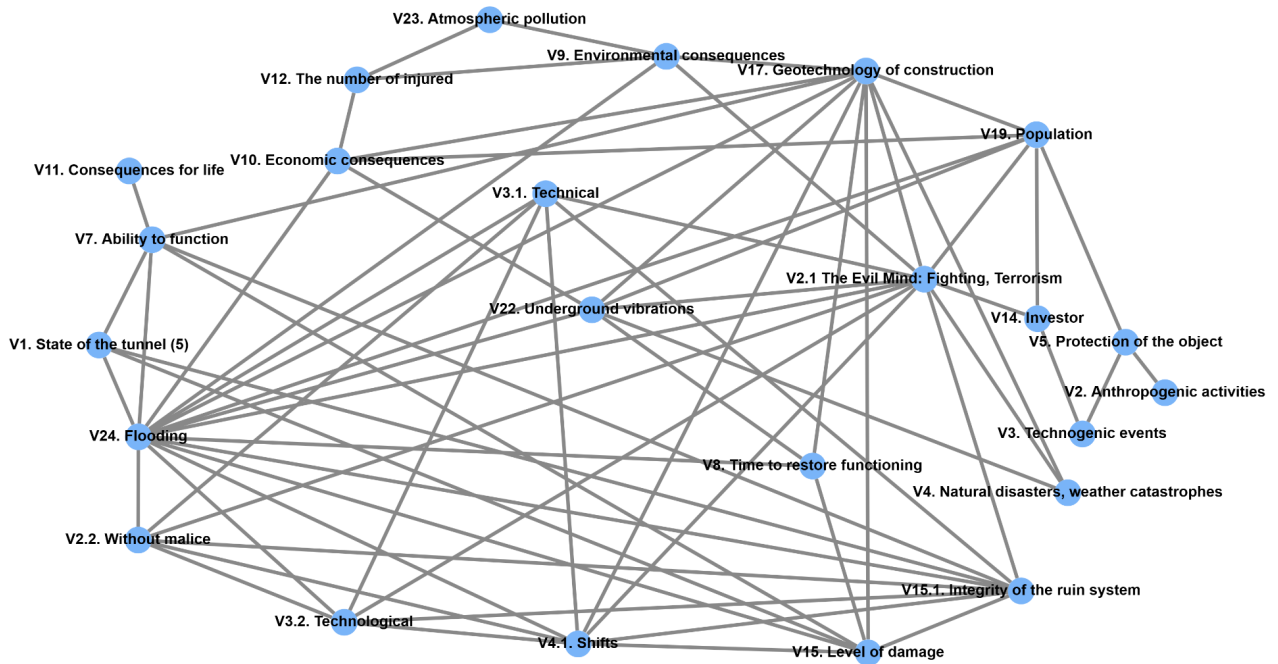


Рис. 4.20 – Симпліціальний комплекс K_{V_Y} нової когнітивної карти тунелю 5

Симпліціальний комплекс K_{V_Y} містить один 6-вимірний симплекс — σ_6^{V15} , два 4-вимірні симплекси — σ_4^{V8} та σ_4^{V10} , один 3-вимірний симплекс — $\sigma_3^{V4.1}$, шість 2-вимірних симплексів — σ_2^{V1} , σ_2^{V7} , σ_2^{V9} , σ_2^{V11} , σ_2^{V12} , $\sigma_2^{V15.1}$, дванадцять 1-вимірних симплексів — σ_1^{V2} , $\sigma_1^{V2.1}$, $\sigma_1^{V3.1}$, $\sigma_1^{V3.2}$, σ_1^{V4} , σ_1^{V5} , σ_1^{V6} , σ_1^{V14} , σ_1^{V17} , σ_1^{V19} , σ_1^{V22} , σ_1^{V24} , три 0-вимірні симплекси — $\sigma_0^{V2.2}$, σ_0^{V3} та σ_0^{V23} .

Аналіз структури K_{V_Y} підтверджує структурну цілісність системи. Відсутність ізольованих вершин та компонент свідчить про достатню зв'язність, що забезпечує можливість керування всіма елементами системи.

Найінформативнішим симплексом є σ_6^{V15} , сформований вершиною V15 (Level of damage), який об'єднує 7 вершин. Вилучення вершини V15 призводило б до зміни структури системи.

Перейдемо до q -аналізу симпліціального комплексу K_{V_Y} . Розбиття на q -зв'язні компоненти наведено в табл. 4.25.

Таблиця 4.25 – Аналіз q -зв'язності для симпліціального комплексу K_{V_Y}

q	N	Вершини
6	1	{V15. Level of damage}

Таблиця 4.25 – (продовження)

<i>q</i>	N	Вершини
5	1	{V15. Level of damage}
4	3	{V8. Time to restore functioning}, {V10. Economic consequences}, {V15. Level of damage}
3	4	{V4.1. Shifts}, {V8. Time to restore functioning}, {V10. Economic consequences}, {V15. Level of damage}
2	10	{V1. State of the tunnel (5)}, {V4.1. Shifts}, {V7. Ability to function}, {V8. Time to restore functioning}, {V9. Environmental consequences}, {V10. Economic consequences}, {V11. Consequences for life}, {V12. The number of injured}, {V15.1. Integrity of the system}, {V15. Level of damage}
1	13	{V1. State of the tunnel (5), V10. Economic consequences, V15. Level of damage, V12. The number of injured, V7. Ability to function, V6. The scale of the impact of an undesirable event, V9. Environmental consequences, V24. Flooding}, {V2. Anthropogenic activities}, {V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V3.1. Technical}, {V3.2. Technological}, {V4. Natural disasters, weather catastrophes},

Таблиця 4.25 – (продовження)

q	N	Вершини
		{V4.1. Shifts, V15.1. Integrity of the system, V8. Time to restore functioning}, {V5. Protection of the object}, {V11. Consequences for life}, {V14. Investor}, {V17. Geotechnology of construction}, {V19. Population}, {V22. Underground vibrations}
0	1	{V1. State of the tunnel (5), V24. Flooding, V15. Level of damage, V22. Underground vibrations, V17. Geotechnology of construction, V12. The number of injured, V11. Consequences for life, V14. Investor, V8. Time to restore functioning, V15.1. Integrity of the system, V9. Environmental consequences, V10. Economic consequences, V19. Population, V7. Ability to function, V6. The scale of the impact of an undesirable event, V4.1. Shifts, V4. Natural disasters, weather catastrophes, V23. Atmospheric pollution, V5. Protection of the object, V3.1. Technical, V3.2. Technological, V3. Technogenic events, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V2. Anthropogenic activities}

Результати q -аналізу для K_{V_Y} показують, що максимальний рівень зв'язності досягається для $q_{\max} = 6$, і на рівнях $q = 6$, $q = 5$, $q = 0$ існує лише одна q -зв'язна компонента, яка складається з симплексу σ_6^{V15} . Для $q = 4$ комплекс розпадається на 3 окремі компоненти, що свідчить про зниження щільності зв'язків. Для $q = 3$ комплекс розпадається на 4 компоненти.

Структурний (Q-)вектор комплексу K_{V_Y} має вигляд:

$$Q(K_{V_Y}) = (Q_6, Q_5, Q_4, Q_3, Q_2, Q_1, Q_0) = (1, 1, 3, 4, 10, 13, 1).$$

Додатково обчислено ексцентриситети вершин, що утворюють симплекси у симпліціальному комплексі K_{V_Y} (табл. 4.26), що відображають віддаленість кожного симплексу від решти структури.

Таблиця 4.26 – Ексцентриситети елементів комплексу K_{V_Y}

Ексцентриситет	Значення
ecc (V1. <i>State of the tunnel</i> (5))	0.50
ecc (V10. <i>Economic consequences</i>)	1.50
ecc (V11. <i>Consequences for life</i>)	2
ecc (V12. <i>The number of injured</i>)	0.50
ecc (V14. <i>Investor</i>)	1
ecc (V15. <i>Level of damage</i>)	2.50
ecc (V17. <i>Geotechnology of construction</i>)	1
ecc (V19. <i>Population</i>)	1
ecc (V2. <i>Anthropogenic activities</i>)	1
ecc (V2.1 <i>Malicious intent : Fighting, Terrorism</i>)	1
ecc (V22. <i>Underground vibrations</i>)	1
ecc (V23. <i>Atmospheric pollution</i>)	0
ecc (V24. <i>Flooding</i>)	0
ecc (V3. <i>Technogenic events</i>)	0
ecc (V4. <i>Natural disasters, weather catastrophes</i>)	1
ecc (V5. <i>Protection of the object</i>)	1
ecc (V6. <i>The scale of the impact of an undesirable event</i>)	0
ecc (V7. <i>Ability to function</i>)	0.50
ecc (V8. <i>Time to restore functioning</i>)	1.50
ecc (V9. <i>Environmental consequences</i>)	0.50
ecc (V15.1. <i>Integrity of the system</i>)	0.50
ecc (V2.2. <i>Without malice</i>)	0
ecc (V3.1. <i>Technical</i>)	1
ecc (V3.2. <i>Technological</i>)	1
ecc (V4.1. <i>Shifts</i>)	1

Усі вершини комплексу K_{V_Y} мають скінченні значення ексцентриситету, що підтверджує структурну цілісність системи. Відсутність ізольованих вершин свідчить про достатню зв'язність та можливість ефективного керування всіма елементами.

Побудуємо дуальний симпліціальний комплекс K_{V_X} . Симплекси, що входять в K_{V_X} наведено в таблиці 4.27, графічне представлення K_{V_X} наведено на рисунку 4.21.

Таблиця 4.27 – Симпліціальний комплекс K_{V_X}

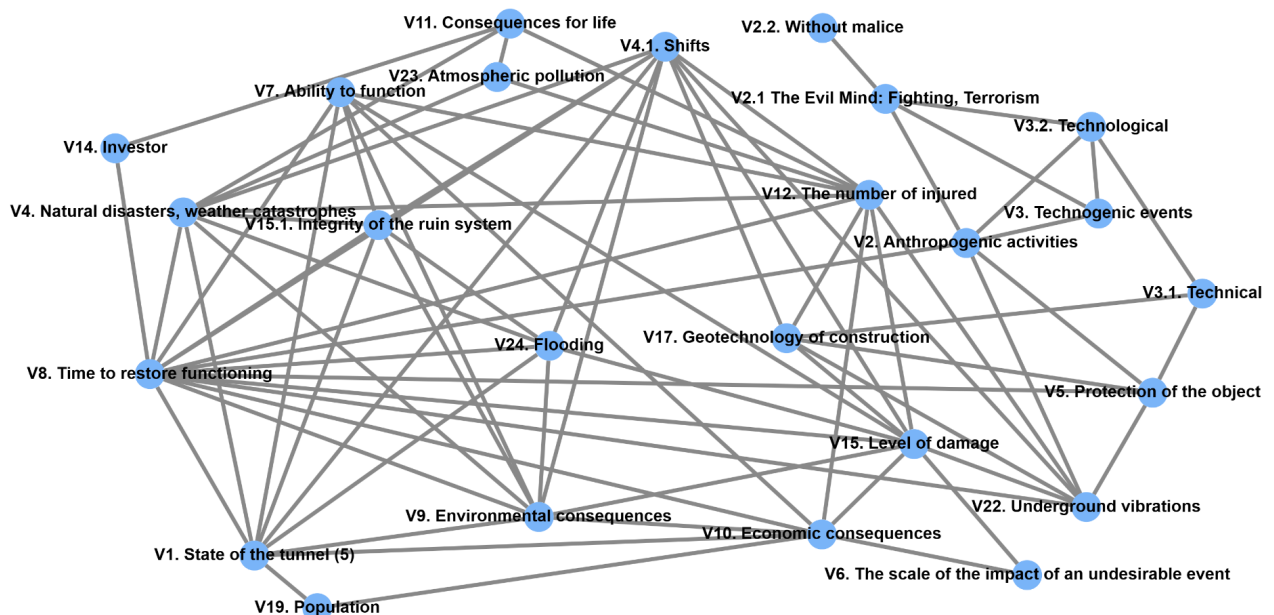
Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_1^{V1}	State of the tunnel (5)	V10. Economic consequences, V6. The scale of the impact of an undesirable event
σ_1^{V10}	Economic consequences	V14. Investor, V8. Time to restore functioning
σ_0^{V11}	Consequences for life	V19. Population
σ_1^{V12}	The number of injured	V11. Consequences for life, V14. Investor
σ_2^{V14}	Investor	V17. Geotechnology of construction, V3.1. Technical, V5. Protection of the object
σ_3^{V15}	Level of damage	V1. State of the tunnel (5), V10. Economic consequences, V7. Ability to function, V9. Environmental consequences
σ_6^{V17}	Geotechnology of construction	V1. State of the tunnel (5), V15.1. Integrity of the system, V24. Flooding, V4. Natural disasters, weather catastrophes, V4.1. Shifts, V8. Time to restore functioning, V9. Environmental consequences
σ_3^{V19}	Population	V2. Anthropogenic activities, V22. Underground vibrations, V5. Protection of the object, V8. Time to restore functioning

Таблиця 4.27 – (продовження)

Сим- плекс	Вершина когнітивної карти, що по- роджує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_1^{V2}	Anthropogenic activities	V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice
$\sigma_4^{V2.1}$	Malicious intent: Fighting, Terrorism	V12. The number of injured, V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction, V22. Underground vibrations, V4.1. Shifts
σ_2^{V22}	Underground vibrations	V15.1. Integrity of the system, V4.1. Shifts, V8. Time to restore functioning
σ_0^{V23}	Atmospheric pollution	V11. Consequences for life
σ_4^{V24}	Flooding	V10. Economic consequences, V12. The number of injured, V15. Level of damage, V7. Ability to function, V8. Time to restore functioning
σ_1^{V3}	Technogenic events	V3.1. Technical, V3.2. Technological
σ_0^{V4}	Natural disasters, weather catastrophes	V4.1. Shifts
σ_3^{V5}	Protection of the object	V2. Anthropogenic activities, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V3. Technogenic events, V3.2. Technological
σ_{-1}^{V6}	The scale of the impact of an undesirable event	
σ_2^{V7}	Ability to function	V1. State of the tunnel (5), V10. Economic consequences, V19. Population
σ_1^{V8}	Time to restore functioning	V15.1. Integrity of the system, V7. Ability to function

Таблиця 4.27 – (продовження)

Сим-плекс	Вершина когнітивної карти, що породжує симплекс	Вершини, що входять до симплексу
σ_3^{V9}	Environmental consequences	V11. Consequences for life, V12. The number of injured, V23. Atmospheric pollution, V4. Natural disasters, weather catastrophes
$\sigma_2^{V15.1}$	Integrity of the system	V10. Economic consequences, V15. Level of damage, V6. The scale of the impact of an undesirable event
$\sigma_0^{V2.2}$	Without malice	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V3.1}$	Technical	V15. Level of damage
$\sigma_0^{V3.2}$	Technological	V15. Level of damage
$\sigma_2^{V4.1}$	Shifts	V15. Level of damage, V24. Flooding, V9. Environmental consequences

Рис. 4.21 – Симпліціальний комплекс K_{V_X}

Симпліціальний комплекс K_{V_X} містить один 6-вимірний симплекс — σ_6^{V17} , два 4-вимірні симплекси — $\sigma_4^{V2.1}$ та σ_4^{V24} , чотири 3-вимірні симплекси — σ_3^{V5} ,

σ_3^{V9} , σ_3^{V15} та σ_3^{V19} , п'ять 2-вимірних симплексів — $\sigma_2^{V4.1}$, σ_2^{V7} , σ_2^{V14} , $\sigma_2^{V15.1}$, σ_2^{V22} , шість 1-вимірних симплексів — σ_1^{V1} , σ_1^{V2} , σ_1^{V3} , σ_1^{V8} , σ_1^{V10} , σ_1^{V12} , шість 0-вимірних симплексів — $\sigma_0^{V2.2}$, $\sigma_0^{V3.1}$, $\sigma_0^{V3.2}$, σ_0^{V4} , σ_0^{V23} , σ_0^{V11} .

Крім того, K_{V_X} містить один порожній симплекс (тобто такий, що не містить вершин і має розмірність -1): σ_{-1}^{V6} .

Аналіз структури K_{V_X} підтверджує структурну цілісність системи. Відсутність ізольованих вершин та компонент свідчить про достатню зв'язність, що забезпечує можливість керування всіма елементами системи.

Найінформативнішим симплексом є σ_6^{V17} , сформований вершиною V17 (Geotechnology of construction), який об'єднує 7 вершин. Вилучення вершини V17 призводило б до зміни структури системи.

Перейдемо до q -аналізу симпліціального комплексу K_{V_X} . Розбиття на q -зв'язні компоненти наведено в табл. 4.28.

Таблиця 4.28 – Аналіз q -зв'язності для симпліціального комплексу K_{V_X}

q	N	Вершини
6	1	{V17. Geotechnology of construction}
5	1	{V17. Geotechnology of construction}
4	3	{V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V17. Geotechnology of construction}, {V24. Flooding}
3	7	{V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V5. Protection of the object}, {V9. Environmental consequences}, {V15. Level of damage}, {V17. Geotechnology of construction}, {V19. Population}, {V24. Flooding}
2	11	{V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V4.1. Shifts}, {V5. Protection of the object},

Таблиця 4.28 – (продовження)

<i>q</i>	N	Вершини
		{V7. Ability to function}, {V9. Environmental consequences}, {V14. Investor}, {V15.1. Integrity of the system}, {V15. Level of damage}, {V17. Geotechnology of construction, V22. Underground vibrations}, {V19. Population}, {V24. Flooding}
1	10	{V1. State of the tunnel (5), V15.1. Integrity of the system, V24. Flooding, V15. Level of damage, V17. Geotechnology of construction, V22. Underground vibrations, V4.1. Shifts, V7. Ability to function, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism}, {V2. Anthropogenic activities}, {V3. Technogenic events}, {V5. Protection of the object}, {V8. Time to restore functioning}, {V9. Environmental consequences}, {V10. Economic consequences}, {V12. The number of injured}, {V14. Investor}, {V19. Population}
0	1	{V1. State of the tunnel (5), V24. Flooding, V22. Underground vibrations, V19. Population, V17. Geotechnology of construction, V15. Level of damage,

Таблиця 4.28 – (продовження)

q	N	Вершини
		V15.1. Integrity of the system, V7. Ability to function, V11. Consequences for life, V4.1. Shifts, V3.2. Technological, V3.1. Technical, V2.2. Without malice, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V14. Investor, V3. Technogenic events, V5. Protection of the object, V2. Anthropogenic activities, V9. Environmental consequences, V12. The number of injured, V10. Economic consequences, V23. Atmospheric pollution, V4. Natural disasters, weather catastrophes, V8. Time to restore functioning}

Результати q -аналізу для K_{V_X} показують, що максимальний рівень зв'язності досягається для $q_{\max} = 6$, і на рівнях $q = 6$, $q = 5$, $q = 0$ існує лише одна q -зв'язна компонента, яка складається з симплексу σ_6^{V17} . Для $q = 4$ комплекс розпадається на 3 окремі компоненти, що свідчить про зниження щільності зв'язків. Для $q = 3$ комплекс розпадається на 7 компонент.

Структурний (Q-)вектор комплексу K_{V_X} має вигляд:

$$\mathbf{Q}(K_{V_X}) = (Q_6, Q_5, Q_4, Q_3, Q_2, Q_1, Q_0) = (1, 1, 3, 7, 11, 10, 1).$$

Додатково обчислено ексцентриситети вершин, що утворюють симплекси у симпліціальному комплексі K_{V_X} (табл. 4.29), що відображають віддаленість кожного симплексу від решти структури.

Таблиця 4.29 – Ексцентриситети елементів комплексу K_{V_X}

Ексцентриситет	Значення
$\text{ecc}(V1. \text{ State of the tunnel } (5))$	0
$\text{ecc}(V10. \text{ Economic consequences})$	1
$\text{ecc}(V11. \text{ Consequences for life})$	0
$\text{ecc}(V12. \text{ The number of injured})$	1
$\text{ecc}(V14. \text{ Investor})$	2
$\text{ecc}(V15. \text{ Level of damage})$	1
$\text{ecc}(V17. \text{ Geotechnology of construction})$	1.33
$\text{ecc}(V19. \text{ Population})$	3

Таблиця 4.29 – (продовження)

Ексцентриситет	Значення
<i>ecc (V2. Anthropogenic activities)</i>	1
<i>ecc (V2.1 Malicious intent : Fighting, Terrorism)</i>	1.50
<i>ecc (V22. Underground vibrations)</i>	0
<i>ecc (V23. Atmospheric pollution)</i>	0
<i>ecc (V24. Flooding)</i>	1.50
<i>ecc (V3. Technogenic events)</i>	1
<i>ecc (V4. Natural disasters, weather catastrophes)</i>	0
<i>ecc (V5. Protection of the object)</i>	3
<i>ecc (V7. Ability to function)</i>	0.50
<i>ecc (V8. Time to restore functioning)</i>	1
<i>ecc (V9. Environmental consequences)</i>	3
<i>ecc (V15.1. Integrity of the system)</i>	0.50
<i>ecc (V2.2. Without malice)</i>	0
<i>ecc (V3.1. Technical)</i>	0
<i>ecc (V3.2. Technological)</i>	0
<i>ecc (V4.1. Shifts)</i>	0.50

Усі вершини комплексу K_{V_X} мають скінченні значення ексцентриситету, що підтверджує структурну цілісність системи. Відсутність ізольованих вершин свідчить про достатню зв'язність та можливість ефективного керування всіма елементами.

Результати аналізу свідчать про структурну цілісність нових когнітивних карт тунелів 1 і 5.

4.12 Пошук та аналіз спільнот і модулярності нових когнітивних карт тунелів 1 і 5

Для обґрунтування кількісних вагових характеристик нових когнітивних карт тунелів 1 і 5 застосуємо пошук та аналіз спільнот.

4.12.1 Пошук та аналіз спільнот і модулярності нової когнітивної карти тунелю 1

Проведемо пошук спільнот та обчислення модулярності для нової когнітивної карти тунелю 1, використовуючи методи, що було представлено в підрозділі 3.3. Отримані результати представлено на рисунку 4.22.

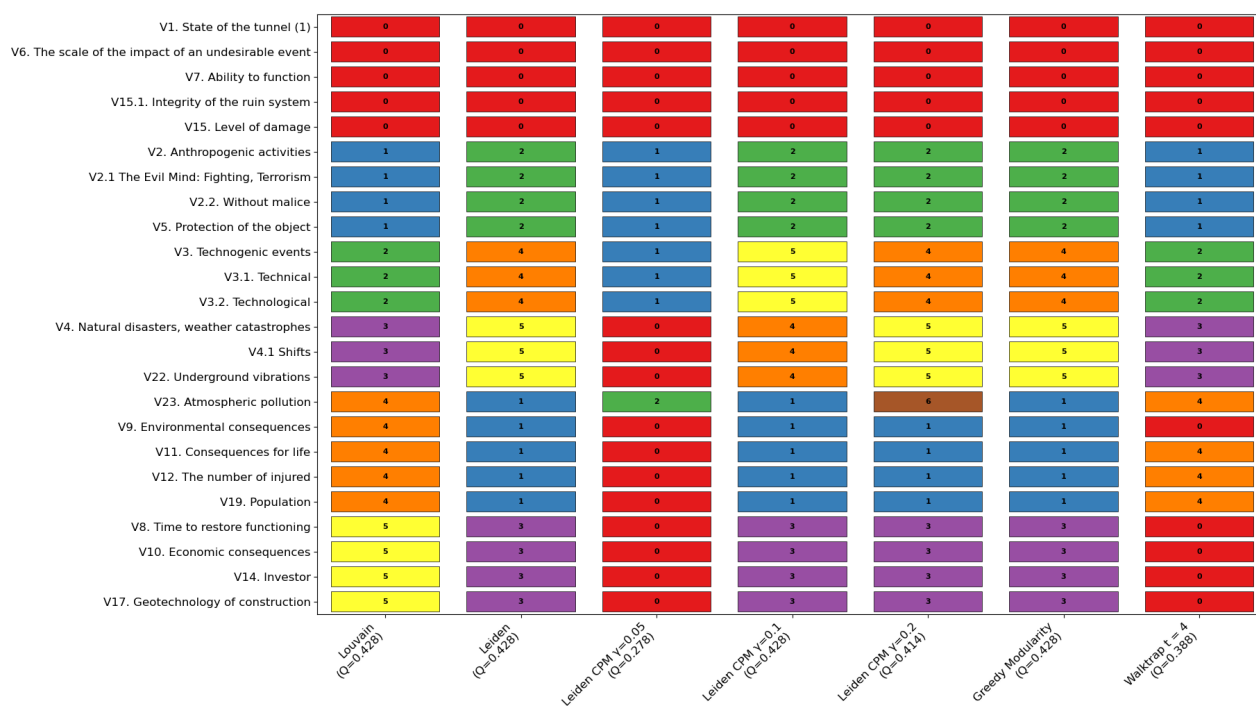


Рис. 4.22 – Спільноти нової когнітивної карти тунелю 1

Таблиця з елементами всіх знайдених спільнот (індекс спільнот взято згідно з методом Лейдена - другої колонки рисунка 4.22) та їх внутрішня щільність ρ_{in} приведено в таблиці 4.30, графічне представлення спільнот у вигляді графу зображено на рисунку 4.23.

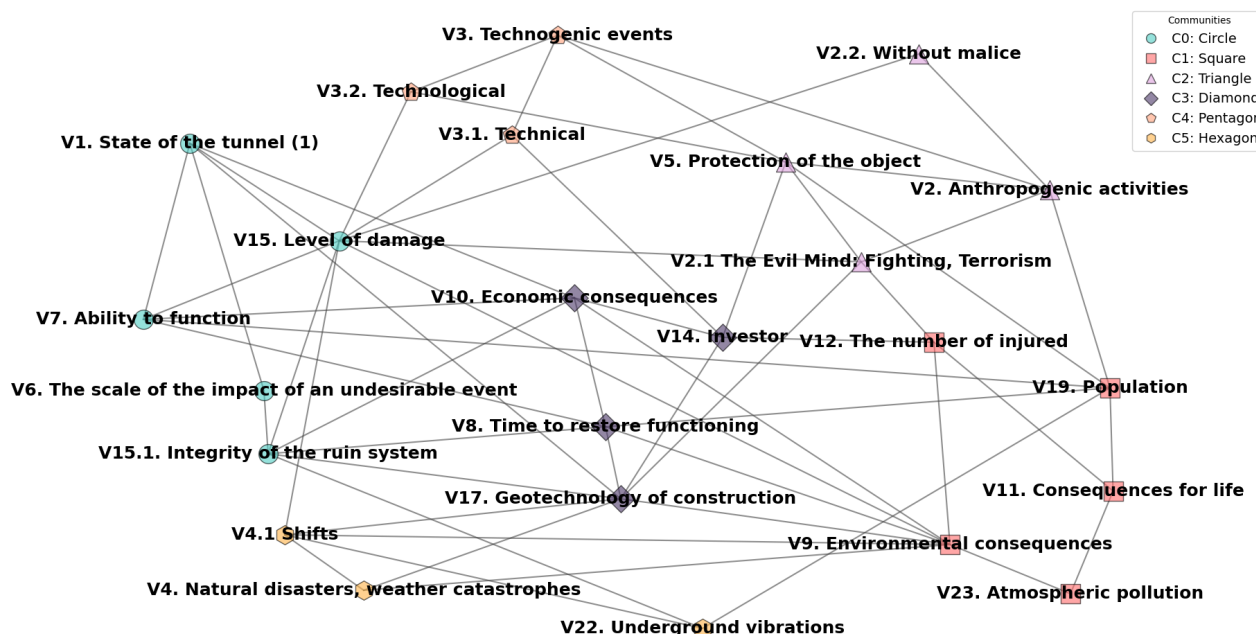


Рис. 4.23 – Спільноти нової когнітивної карти тунеля 1

Таблиця 4.30 – Список спільнот нової когнітивної карти тунелю 1

Спільнота	Вершини спільноти	ρ_{in}
0	V1. State of the tunnel (1), V6. The scale of the impact of an undesirable event, V7. Ability to function, V15.1. Integrity of the system, V15. Level of damage	0.5200
1	V23. Atmospheric pollution, V9. Environmental consequences, V11. Consequences for life, V12. The number of injured, V19. Population	0.3400
2	V2. Anthropogenic activities, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V5. Protection of the object	0.6250
3	V8. Time to restore functioning, V10. Economic consequences, V14. Investor, V17. Geotechnology of construction	0.3500
4	V3. Technogenic events, V3.1. Technical, V3.2. Technological	0.6667
5	V4. Natural disasters, weather catastrophes, V4.1 Shifts, V22. Underground vibrations	0.6000

Застосування алгоритмів виявлення спільнот до когнітивної карти тунеля 1 дозволило виявити 6 функціональних модулів з показником модулярності $Q = 0.428$, що свідчить про наявність чіткої структури спільнот.

Спільнота 0: Технічний стан та пошкодження системи. Об'єднує вершини V1 (Стан тунелю), V6 (Масштаб впливу небажаної події), V7 (Здатність функціонувати), V15 (Рівень пошкоджень) та V15.1 (Цілісність системи). Ця спільнота відображає ядро технічної життєздатності тунелю — взаємозв'язок між поточним станом інфраструктури, її функціональними можливостями та ступенем пошкоджень внаслідок небажаних подій.

Спільнота 1: Екологічні та соціальні наслідки. Містить V23 (Атмосферне забруднення), V9 (Екологічні наслідки), V11 (Наслідки для життя), V12 (Кількість постраждалих) та V19 (Населення). Спільнота формує ланцюг причинно-наслідкових зв'язків від екологічних подій до їх впливу на населення, що є критичним для оцінки соціальних ризиків тунельної інфраструктури.

Спільнота 2: Антропогенні загрози та захист. Включає V2 (Антропогенна діяльність), V2.1 (Зловмисні дії: бойові дії, тероризм), V2.2 (Без злого наміру) та V5 (Захист об'єкта). Ієрархічна структура спільноти демонструє декомпозицію антропогенних факторів на підтипи та їх безпосередній зв'язок із заходами захисту.

Спільнота 3: Економічні аспекти та відновлення. Об'єднує V8 (Час відновлення функціонування), V10 (Економічні наслідки), V14 (Інвестор) та V17 (Геотехнологія будівництва). Спільнота відображає фінансово-відновлювальний блок: технології будівництва впливають на час відновлення, що визначає економічні наслідки та інвестиційну привабливість.

Спільнота 4: Техногенні події. Містить V3 (Техногенні події), V3.1 (Технічні) та V3.2 (Технологічні). Компактна спільнота з чіткою ієрархічною структурою відображає класифікацію техногенних загроз відповідно до ієрархічної структури когнітивної карти.

Спільнота 5: Природні катастрофи та геодинамічні фактори. Включає V4 (Природні катастрофи, погодні катаклізми), V4.1 (Зсуви) та V22 (Підземні вібрації). Спільнота об'єднує природні геодинамічні фактори, що можуть впливати на стійкість підземної інфраструктури.

Виявлена структура спільнот підтверджує логічну організацію когнітивної карти: ієрархічні вершини (V2.1, V2.2, V3.1, V3.2, V4.1) групуються разом із батьківськими вершинами, що свідчить про коректність визначення вагових коефіцієнтів для ієрархічних зв'язків. Функціональне групування неієрархічних вершин (наприклад, об'єднання економічних факторів V8, V10, V14, V17 або екологічно-соціального ланцюга V9, V11, V12, V19, V23) демонструє наявність семантично пов'язаних концептів в когнітивній моделі.

4.12.2 Пошук та аналіз спільнот і модулярності нової когнітивної карти тунелю 5

Проведемо пошук спільнот та обчислення модулярності для нової когнітивної карти тунелю 5, аналогічно до тунелю 1. Отримані результати представлено на рисунку 4.24.

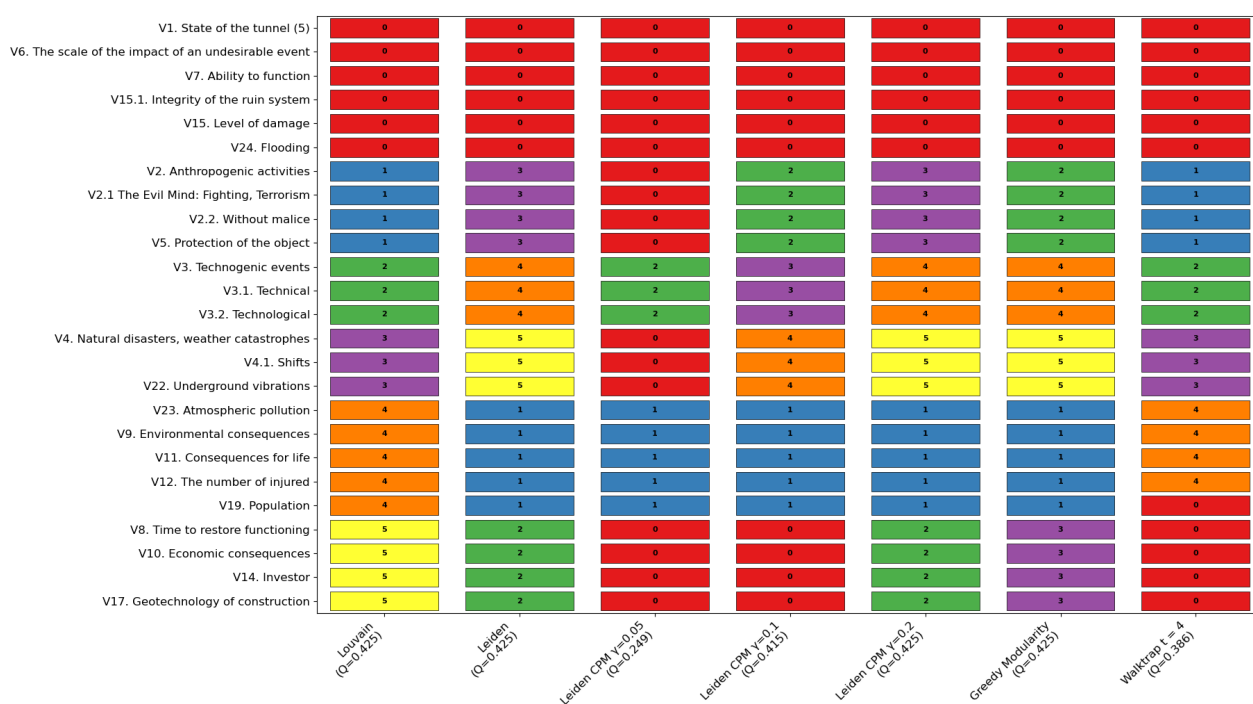


Рис. 4.24 – Спільноти нової когнітивної карти тунелю 5

Таблиця з елементами всіх знайдених спільнот (індекс спільнот взято згідно з методом Лейдена - другої колонки рисунка 4.24) та їх внутрішня щільність ρ_{in} приведено в таблиці 4.31, графічне представлення спільнот у вигляді графу зображено на рисунку 4.25.

Таблиця 4.31 – Список спільнот нової когнітивної карти тунелю 5

Спільнота	Вершини спільноти	ρ_{in}
0	V1. State of the tunnel (5), V6. The scale of the impact of an undesirable event, V7. Ability to function, V15.1. Integrity of the system, V15. Level of damage, V24. Flooding	0.4253
1	V23. Atmospheric pollution, V9. Environmental consequences, V11. Consequences for life, V12. The number of injured, V19. Population	0.3350
2	V8. Time to restore functioning, V10. Economic consequences, V14. Investor, V17. Geotechnology of construction	0.4900
3	V2. Anthropogenic activities, V2.1 Malicious intent: Fighting, Terrorism, V2.2. Without malice, V5. Protection of the object	0.6250
4	V3. Technogenic events, V3.1. Technical, V3.2. Technological	0.6667
5	V4. Natural disasters, weather catastrophes, V4.1. Shifts, V22. Underground vibrations	0.5667

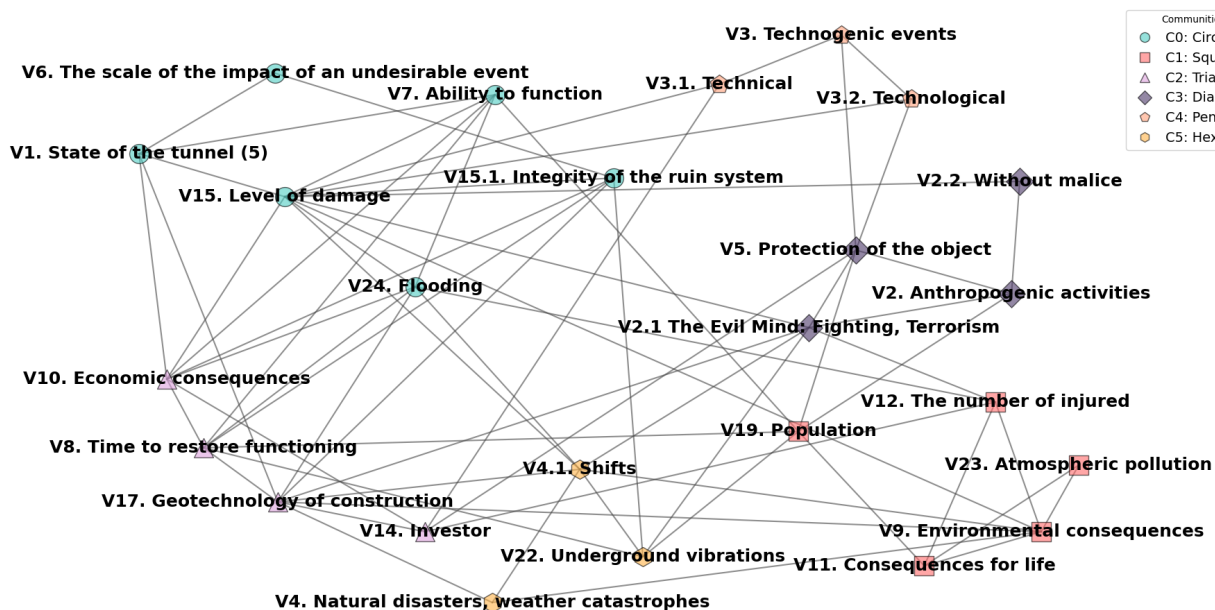


Рис. 4.25 – Спільноти нової когнітивної карти тунелю 5

Застосування алгоритмів виявлення спільнот до когнітивної карти тунелю 5 дозволило виявити 6 функціональних модулів з показником модулярності $Q =$

0.425, що свідчить про наявність чіткої структури спільнот. Структура знайдених спільнот значною мірою повторює результати аналізу тунелю 1.

Спільноти, що повторюються. П'ять із шести виявлених спільнот є ідентичними для обох когнітивних карт:

- **Спільнота 1** (екологічні та соціальні наслідки): V23, V9, V11, V12, V19;
- **Спільнота 2** (економічні аспекти та відновлення): V8, V10, V14, V17;
- **Спільнота 3** (антропогенні загрози та захист): V2, V2.1, V2.2, V5;
- **Спільнота 4** (техногенні події): V3, V3.1, V3.2;
- **Спільнота 5** (природні катастрофи та геодинамічні фактори): V4, V4.1, V22.

Така стійкість структури спільнот підтверджує, що виявлені функціональні модулі відображають фундаментальні закономірності організації когнітивної карти, інваріантні щодо специфічних характеристик окремих тунелів.

Спільнота 0: Технічний стан та пошкодження системи. Єдина структурна відмінність полягає у складі спільноти 0, яка для тунелю 5 містить додаткову вершину V24 (Flooding). Таким чином, спільнота об'єднує вершини V1 (Стан тунелю), V6 (Масштаб впливу небажаної події), V7 (Здатність функціонувати), V15 (Рівень пошкоджень), V15.1 (Цілісність системи) та V24 (Підтоплення).

Включення вершини V24 до цієї спільноти є семантично обґрунтованим: підтоплення безпосередньо впливає на технічний стан тунельної конструкції, визначає масштаб пошкоджень та суттєво обмежує здатність системи функціонувати. Для підземних інфраструктурних об'єктів ризик підтоплення є одним із ключових факторів, що визначає їх експлуатаційну надійність, тому його інтеграція до спільноти технічного стану відображає реальні причинно-наслідкові залежності в системі. Включення даної вершини в когнітивну карту тунелю 5 обумовлено знаходженням частини тунеля під р. Дніпро.

Як і для тунеля 1, виявлена структура спільнот підтверджує логічну організацію когнітивної карти тунеля 5.

4.13 Обґрунтування структурної і чисельної стійкості нових когнітивних карт тунелів 1 і 5

Аналіз структурної і чисельної стійкості нової когнітивної карти тунелю 1 і 5 приведено на рисунках 4.26 і 4.27 відповідно.

	Re	Im	Abs
1	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.00000	0.00000	0.00000
3	0.00000	0.00000	0.00000
4	-0.00000	0.00000	0.00001
5	-0.00000	-0.00000	0.00001
6	0.00001	0.00000	0.00001
7	-0.01038	0.00000	0.01038
8	0.04216	0.00000	0.04216
9	-0.04146	0.08301	0.09279
10	-0.04146	-0.08301	0.09279
11	-0.29363	0.06501	0.30074
12	-0.29363	-0.06501	0.30074
13	-0.35410	0.00000	0.35410
14	0.32290	-0.24894	0.40772
15	0.32290	0.24894	0.40772
16	-0.24501	0.63984	0.68515
17	-0.24501	-0.63984	0.68515
18	-0.38394	0.78696	0.87563
19	-0.38394	-0.78696	0.87563
20	0.89324	0.17857	0.91092
21	0.89324	-0.17857	0.91092
22	0.40845	-0.89055	0.97975
23	0.40845	0.89055	0.97975
24	-0.99878	0.00000	0.99878


```

V7->V19->V22->V15.1->V15->V9->V12->V14->V17->V8->V7
V8->V9->V10->V8
V8->V9->V10->V14->V17->V8
V8->V9->V12->V11->V19->V8
V8->V9->V12->V11->V19->V22->V15.1->V10->V8
V8->V9->V12->V11->V19->V22->V15.1->V10->V14->V17->V8
V8->V9->V12->V14->V17->V8
V8->V9->V12->V14->V17->V15.1->V10->V8
V8->V15.1->V10->V8
V8->V15.1->V10->V14->V17->V8
V8->V15.1->V10->V14->V17->V9->V12->V11->V19->V8
V8->V15.1->V15->V9->V10->V8
V8->V15.1->V15->V9->V10->V14->V17->V8
V8->V15.1->V15->V9->V12->V11->V19->V8
V8->V15.1->V15->V9->V12->V14->V17->V8
V9->V10->V14->V17->V9
V9->V10->V14->V17->V15.1->V15->V9
V9->V12->V11->V19->V22->V15.1->V10->V14->V17->V9
V9->V12->V11->V19->V22->V15.1->V15->V9
V9->V12->V14->V17->V9
V9->V12->V14->V17->V15.1->V15->V9
V10->V14->V17->V15.1->V10
Number of cycles: 1978
Positive cycles number: 575
Negative cycles number: 1403
Structurally stable map
The cognitive map is numerically stable

```

Рис. 4.26 – Аналіз структурної і чисельної стійкості нової когнітивної карти тунелю 1

	Re	Im	Abs
2	0.00000	0.00000	0.00000
3	0.00000	-0.00000	0.00000
4	0.00000	0.00000	0.00000
5	-0.00000	0.00000	0.00000
6	0.03647	-0.08122	0.08904
7	0.03647	0.08122	0.08904
8	-0.10189	0.00000	0.10189
9	0.11708	0.00000	0.11708
10	-0.13137	-0.10926	0.17087
11	-0.13137	0.10926	0.17087
12	-0.40865	0.00000	0.40865
13	0.43200	0.00000	0.43200
14	-0.50315	0.08537	0.51034
15	-0.50315	-0.08537	0.51034
16	0.19712	-0.49060	0.52871
17	0.19712	0.49060	0.52871
18	-0.42876	0.37715	0.57103
19	-0.42876	-0.37715	0.57103
20	-0.31053	-0.60437	0.67948
21	-0.31053	0.60437	0.67948
22	0.25659	0.86480	0.90206
23	0.25659	-0.86480	0.90206
24	0.86436	-0.26606	0.90438
25	0.86436	0.26606	0.90438


```

>V11->V19->V22->V8
V9->V11->V19->V22->V15.1->V10->V14->V17->V9
V9->V11->V19->V22->V15.1->V10->V14->V17-
>V24->V15->V9
V9->V11->V19->V22->V15.1->V15->V9
V9->V11->V19->V22->V15.1->V15->V10->V14-
>V17->V9
V9->V12->V11->V19->V22->V15.1->V10->V14-
>V17->V9
V9->V12->V11->V19->V22->V15.1->V10->V14-
>V17->V24->V15->V9
V9->V12->V11->V19->V22->V15.1->V15->V9
V9->V12->V11->V19->V22->V15.1->V15->V10-
>V14->V17->V9
V9->V12->V14->V17->V9
V9->V12->V14->V17->V15.1->V15->V9
V9->V12->V14->V17->V24->V15->V9
V10->V14->V17->V15.1->V10
V10->V14->V17->V15.1->V15->V10
V10->V14->V17->V24->V10
V10->V14->V17->V24->V12->V11->V19->V22-
>V15.1->V10
V10->V14->V17->V24->V12->V11->V19->V22-
>V15.1->V15->V10
V10->V14->V17->V24->V15->V10
V12->V14->V17->V24->V12
Number of cycles: 8148
Positive cycles number: 2541
Negative cycles number: 5607
Structurally stable map
The cognitive map is numerically stable

```

Рис. 4.27 – Аналіз структурної і чисельної стійкості нової когнітивної карти тунелю 5

Для когнітивної карти тунелю 1 максимальне за модулем власне значення $0.99878 < 1$, що свідчить про чисельну стійкість.

Граф когнітивної карти тунелю 1 містить 1978 циклів, серед яких 575 де-стабілізуючих циклів та 1403 стабілізуючих циклів, що свідчить про структурну

стійкість когнітивної карти тунелю 1, оскільки кількість стабілізуючих циклів перевищує кількість дестабілізуючих.

Для когнітивної карти тунелю 5 максимальне за модулем власне значення $0.90438 < 1$, що свідчить про чисельну стійкість.

Граф когнітивної карти тунелю 5 містить 8148 циклів, серед яких 2541 дестабілізуючих циклів та 5607 стабілізуючих циклів, що свідчить про структурну стійкість когнітивної карти тунелю 5, оскільки кількість стабілізуючих циклів перевищує кількість дестабілізуючих.

Оскільки когнітивні карти тунелів 1 і 5 структурно та чисельно стійкі, побудову когнітивних моделей тунелів 1 і 5 завершено, що дає право перейти до процедур імпульсного когнітивного моделювання.

4.14 Імпульсне когнітивне моделювання

В даному підрозділі розглянуто, як побудова когнітивної моделі впливає на результати імпульсного когнітивного моделювання, та побудовано різноманітні сценарії для оцінювання наслідків різноманітних загроз для тунелів 1 і 5, наслідків для навколишнього середовища, життєдіяльності людини та економічних факторів.

4.14.1 Порівняння результатів моделювання до і після побудови когнітивної моделі

Для тунелю 1 розглянемо сценарій реалізації загрози терористичного характеру подавши імпульс у вершину $V_{2.1}$ Malicious intent: Fighting, Terrorism використовуючи вектор збурень $Q = (0, \dots, q_{V_{2.1}} = 1, \dots, 0)$, використовуючи когнітивну карту тунелю 1 до і після побудови когнітивної моделі. Результати імпульсного когнітивного моделювання для когнітивної карти тунелю 1 до побудови когнітивної моделі наведено на рисунку 4.28, для когнітивної карти тунелю 1 після побудови когнітивної моделі на рисунку 4.29, порівняння отриманих результатів наведено у таблиці 4.32. Для оцінки різниці в % використано симетричну різницю формату $\frac{|a-b|}{\max(|a|, |b|)}$.

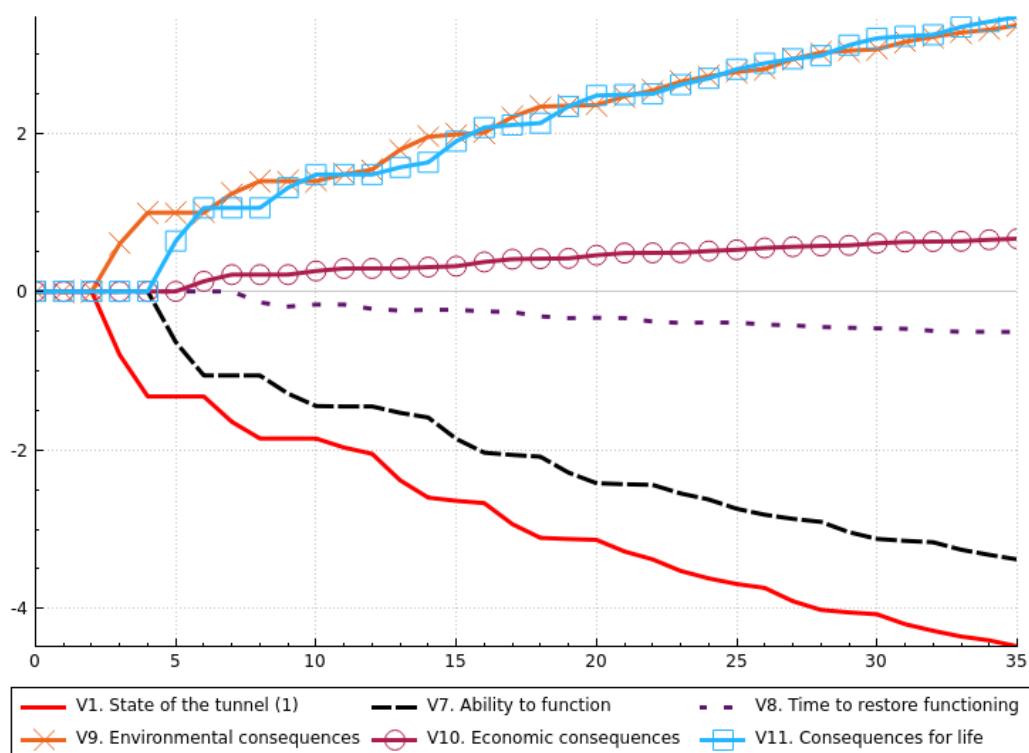


Рис. 4.28 – Сценарій реалізації загрози терористичного характеру для тунелю 1 до побудови когнітивної моделі

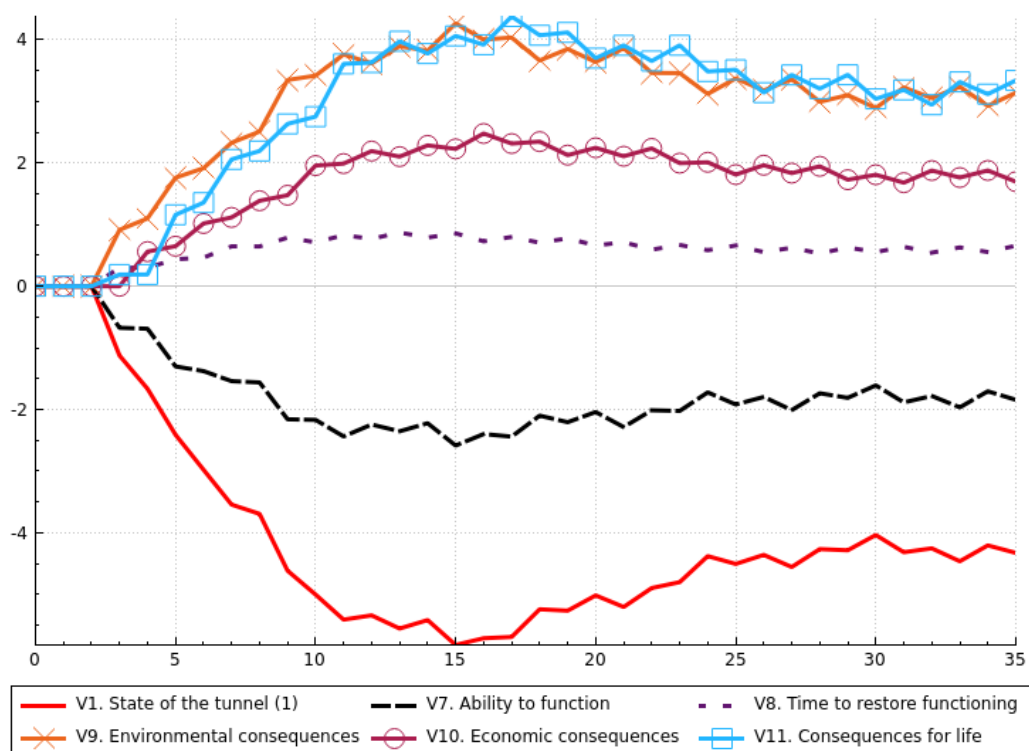


Рис. 4.29 – Сценарій реалізації загрози терористичного характеру для тунелю 1 після побудови когнітивної моделі

Таблиця 4.32 – Comparison of modeling results

Назва вершини (V_i)	Значення V_i до побудови когнітивної моделі	Значення V_i після побудови когнітивної моделі	Різниця (%)
V_1 . State of the tunnel	-4.4768	-4.3291	3.30
V_7 . Ability to function	-3.3805	-1.8444	45.44
V_8 . Time to restore functioning	-0.51136	0.65796	177.72
V_9 . Environmental consequences	3.3576	3.1423	6.41
V_{10} . Economic consequences	0.6645	1.6973	60.85
V_{11} . Consequences for life	3.4605	3.3407	3.46

Як видно з результатів моделювання, для обох когнітивних карт тунелю 1, потенційний теракт веде до зниження показників стану тунеля (V_1) та його можливості функціонувати (V_7), у той самий час, зростають показники наслідків для оточення (V_9), економічних наслідків (V_{10}) та наслідків для життєдіяльності (V_{11}). При цьому, поведінка у вершині V_8 - час до відновлення функціонування, сильно відрізняється. До побудови когнітивної моделі, після потенційного теракту, час на відновлення функціонування зменшувався, що неможливо при даному типі загроз, що вказує на проблеми когнітивної карти тунелю 1 до побудови когнітивної моделі, що було виявлено в процесі побудови когнітивної моделі. Після побудови когнітивної моделі, час на відновлення об'єкту після теракту, очікувано збільшується.

Також, помітимо, що після побудови когнітивної моделі, можна прослідкувати динаміку змін досліджуємих вершин, де після спадання/зростання показників (прямих наслідків небажаної події), йде етап стабілізації, тобто зростання/спадання відповідних досліджуємих вершин в іншому напрямі на відмінеу від першого етапу. На прикладі вершини V_1 , з рисунку 4.29 бачимо, що етап стабілізації починається з 15 кроку моделювання, а коливання починають згасати (тобто зменшувати амплітуду) ближче до 35 кроку. До побудови когнітивної

моделі, етап стабілізації не спостерігався, що не є характерним для складних систем відкритого типу.

Помітимо також, що навіть не беручи в розрахунок вершину V_8 , про яку було сказано вище, після побудови моделі, для деяких вершин, а саме V_7 та V_{10}), результати моделювання змінилилися досить суттєво, а саме на 45.44% і 60.85% відповідно.

Даний аналіз демонструє необхідність в дослідженні структурних та кількісних характеристик когнітивної карти і побудові, завдяки даним дослідженням когнітивної моделі, оскільки це впливає на достовірність отриманих в результаті моделювання даних, що є особливо важливо при оцінюванні критичної інфраструктури.

4.15 Результати імпульсного когнітивного моделювання для побудованих когнітивних моделей тунелів 1 і 5

4.15.1 Сценарій №1: загрози терористичного характеру

Для тунелю 5 розглянемо сценарій реалізації загрози терористичного характеру подавши імпульс у вершину $V_{2.1}$ Malicious intent: Fighting, Terrorism використовуючи вектор збурень $Q = (0, \dots, q_{V_{2.1}} = 1, \dots, 0)$, використовуючи когнітивну карту тунелю 5 після побудови когнітивної моделі. Результати моделювання наведено на рисунку 4.30. Для тунелю 1 такий самий сценарій було побудовано в 4.14.1. Порівняння для тунелів 1 і 5 наведено у таблиці 4.33.

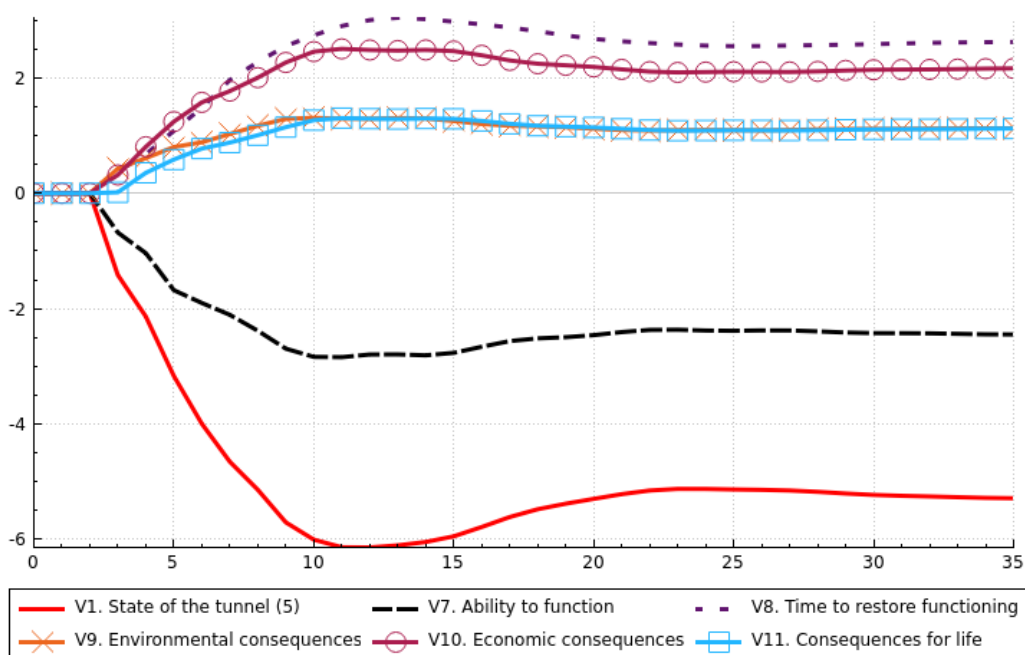


Рис. 4.30 – Сценарій реалізації загрози терористичного характеру для тунелю 5 після побудови когнітивної моделі

Таблиця 4.33 – Сценарій №1. Порівняння результатів моделювання для тунелів 1 і 5

Назва вершини (V_i)	Значення V_i тунель 1	Значення V_i тунель 5	Різниця (%)
V_1 . State of the tunnel	-4.3291	-5.2891	18.15
V_7 . Ability to function	-1.8444	-2.449	24.69
V_8 . Time to restore functioning	0.65796	2.6232	74.92
V_9 . Environmental consequences	3.1423	1.126	64.17
V_{10} . Economic consequences	1.6973	2.1649	21.60
V_{11} . Consequences for life	3.3407	1.1221	66.41

З результатів аналізів видно, що реалізована загроза теракту веде до стрімкого зменшення показників стану тунелів (V_1) та їх можливості до функціонування (V_7), при цьому тунель 1 виявився менш вразливий до подібних загроз. На відновлення тунелю 5 також необхідно більше часу (V_8) та економічних ресурсів (V_{10}), проте довгострокові наслідки для оточення (V_9) та життєдіяльності людини V_{11} помітно менші для тунелю 5.

4.15.2 Сценарій №2: загрози техногенного характеру

Для тунелів 1, 5 розглянемо сценарій реалізації загрози техногенного характеру подавши імпульс у вершину V_3 Technogenic events використовуючи вектор збурень $Q = (0, \dots, q_{V_3} = 1, \dots, 0)$, використовуючи когнітивні карти тунелів 1 і 5, після побудови когнітивної моделі. Результати моделювання наведено на рисунках 4.31, 4.32. Порівняння наслідків для тунелів 1 і 5 наведено у таблиці 4.34.

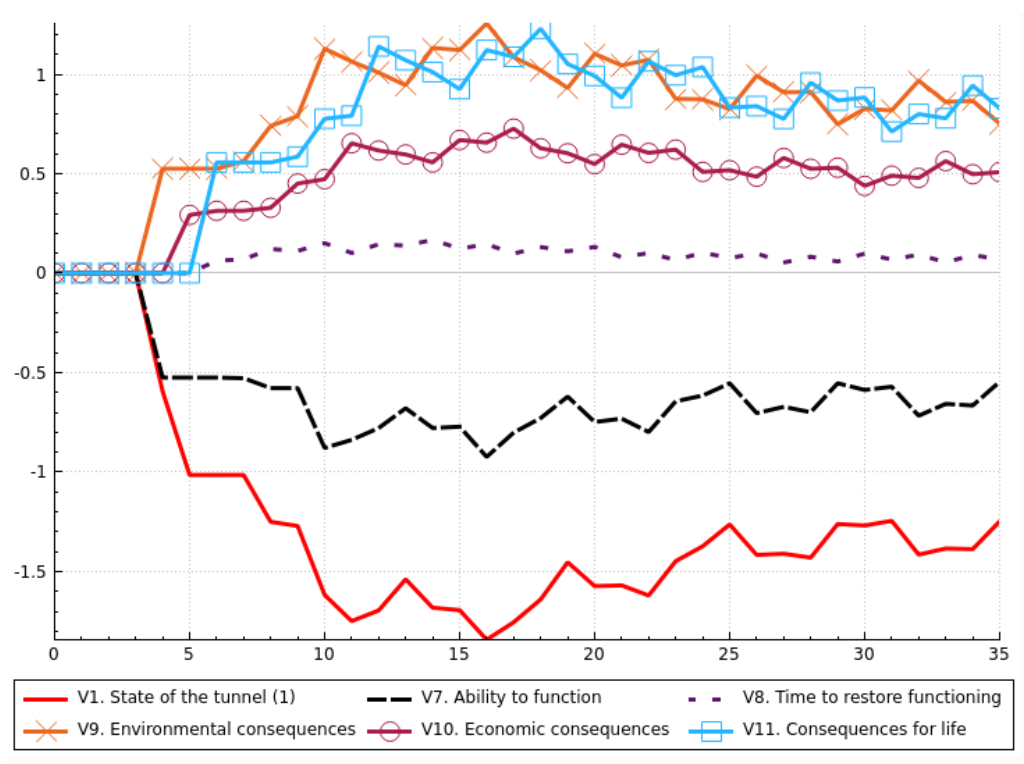


Рис. 4.31 – Сценарій реалізації загрози техногенного характеру для тунелю 1 після побудови когнітивної моделі

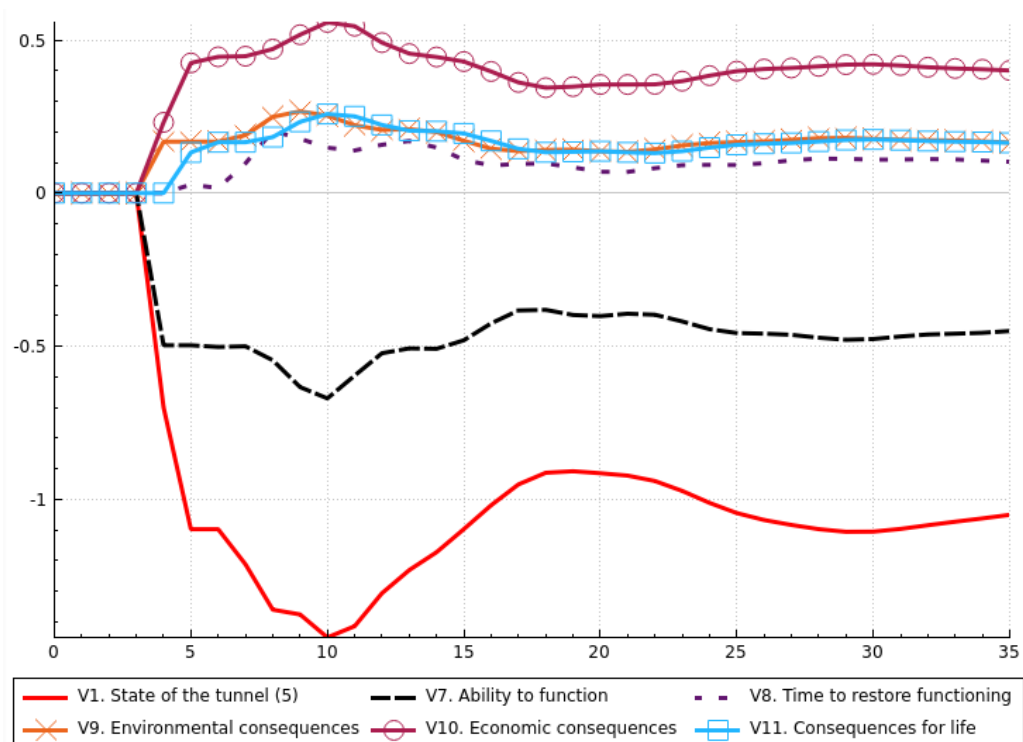


Рис. 4.32 – Сценарій реалізації загрози техногенного характеру для тунелю 5 після побудови когнітивної моделі

Таблиця 4.34 – Сценарій №2. Порівняння результатів моделювання для тунелів 1 і 5

Назва вершини (V_i)	Значення V_i тунель 1	Значення V_i тунель 5	Різниця (%)
V_1 . State of the tunnel	-1.2482	-1.0508	15.81
V_7 . Ability to function	-0.54605	-0.45037	17.52
V_8 . Time to restore functioning	0.069811	0.10219	31.69
V_9 . Environmental consequences	0.75175	0.16519	78.03
V_{10} . Economic consequences	0.50785	0.40048	21.14
V_{11} . Consequences for life	0.82784	0.16433	80.15

Сценарій №2 показав дещо більшу стійкість тунелю 5 до техногенних загроз у порівнянні до тунелю 1 (вершини V_1 , V_7), економічні наслідки, наслідки для оточення та для життєдіяльності людини (V_9 , V_{10} , V_{11} відповідно) вищі для тунелю 1, час на відновлення тунелю (V_8) має низьке значення для обох тунелів, але дещо

вищий для тунелю 5, через дещо більшу складність конструкції (довжина тунеля та його ділянка уздовж р. Дніпро).

4.15.3 Сценарій №3: загрози зсувів порід

Для тунелів 1, 5 розглянемо сценарій реалізації загрози зсувів порід подавши імпульс у вершину $V_{4.1}$ Shifts використовуючи вектор збурень $Q = (0, \dots, q_{V_{4.1}} = 1, \dots, 0)$, використовуючи когнітивні карти тунелів 1 і 5, після побудови когнітивної моделі. Результати моделювання наведено на рисунках 4.33, 4.34. Порівняння наслідків для тунелів 1 і 5 наведено у таблиці 4.35.

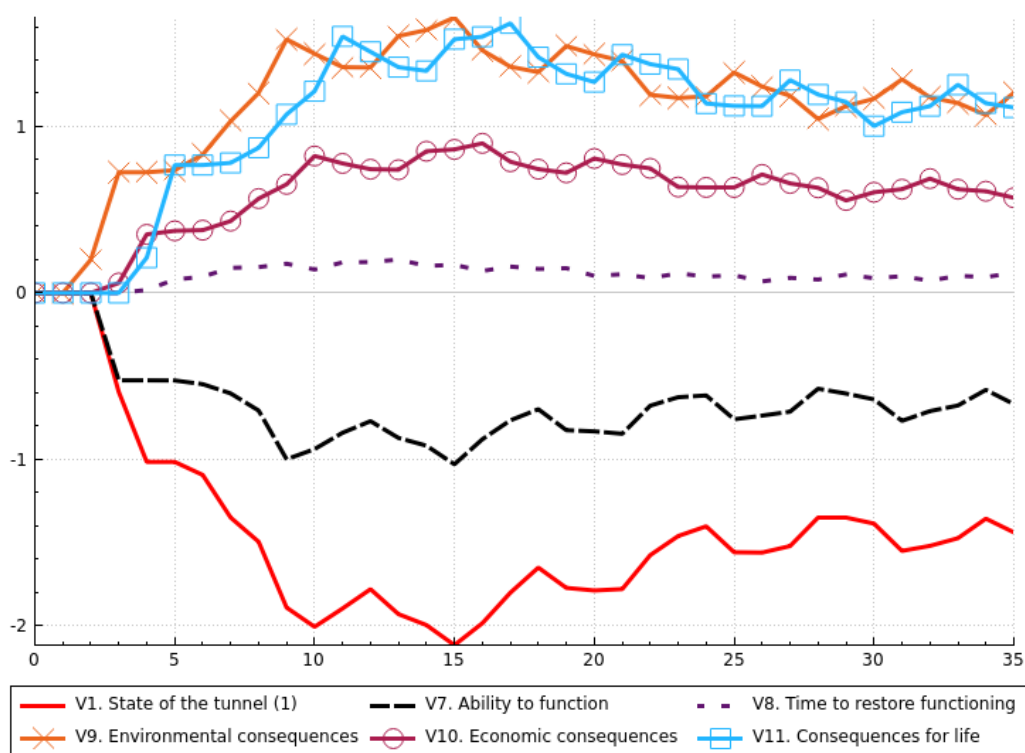


Рис. 4.33 – Сценарій реалізації загрози зсувів порід для тунелю 1 після побудови когнітивної моделі

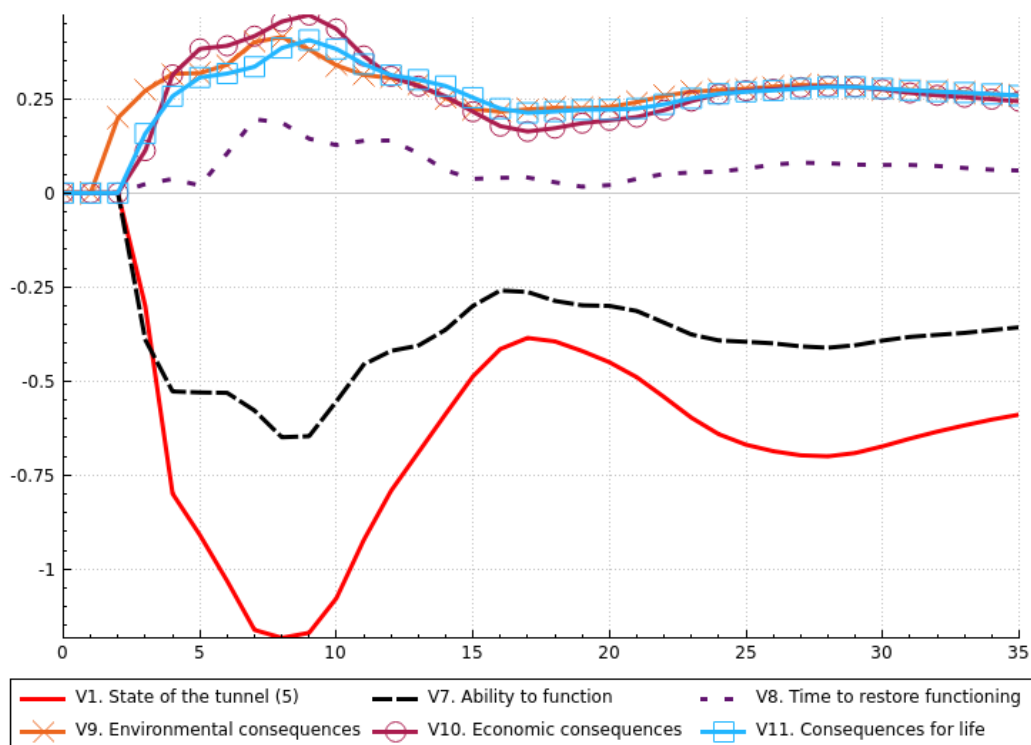


Рис. 4.34 – Сценарій реалізації загрози зсувів порід для тунелю 5 після побудови когнітивної моделі

Таблиця 4.35 – Сценарій №3. Порівняння результатів моделювання для тунелів 1 і 5

Назва вершини (V_i)	Значення V_i тунель 1	Значення V_i тунель 5	Різниця (%)
V_1 . State of the tunnel	-1.4385	-0.589	59.05
V_7 . Ability to function	-0.66782	-0.35703	46.54
V_8 . Time to restore functioning	0.12153	0.059862	50.74
V_9 . Environmental consequences	1.2024	0.25957	78.41
V_{10} . Economic consequences	0.57199	0.2437	57.39
V_{11} . Consequences for life	1.1142	0.25891	76.76

Сценарій №3 показав перевагу тунелю 5 у стійкості до загрози сходу та просадки порід у всіх досліджуваних аспектах. Окрім меншої загрози самому тунелю 5 (вершини V_1 , V_7), спостерігається також відчутна різниця між екологічними наслідками (V_{10}) та наслідками для життєдіяльності (V_{11}), що обґрунтовується

ризиками для екосистеми в районі ботанічного саду, порушення та зміни в якій можуть мати каскадні ефекти.

4.15.4 Сценарій №4: загрози сейсмічного характеру

Для тунелів 1, 5 розглянемо сценарій реалізації загрози сейсмічного характеру подавши імпульс у вершину V_{22} Underground vibrations використовуючи вектор збурень $Q = (0, \dots, q_{V_{4.1}} = 1, \dots, 0)$, використовуючи когнітивні карти тунелів 1 і 5, після побудови когнітивної моделі. Результати моделювання наведено на рисунках 4.35, 4.36. Порівняння наслідків для тунелів 1 і 5 наведено у таблиці 4.36.

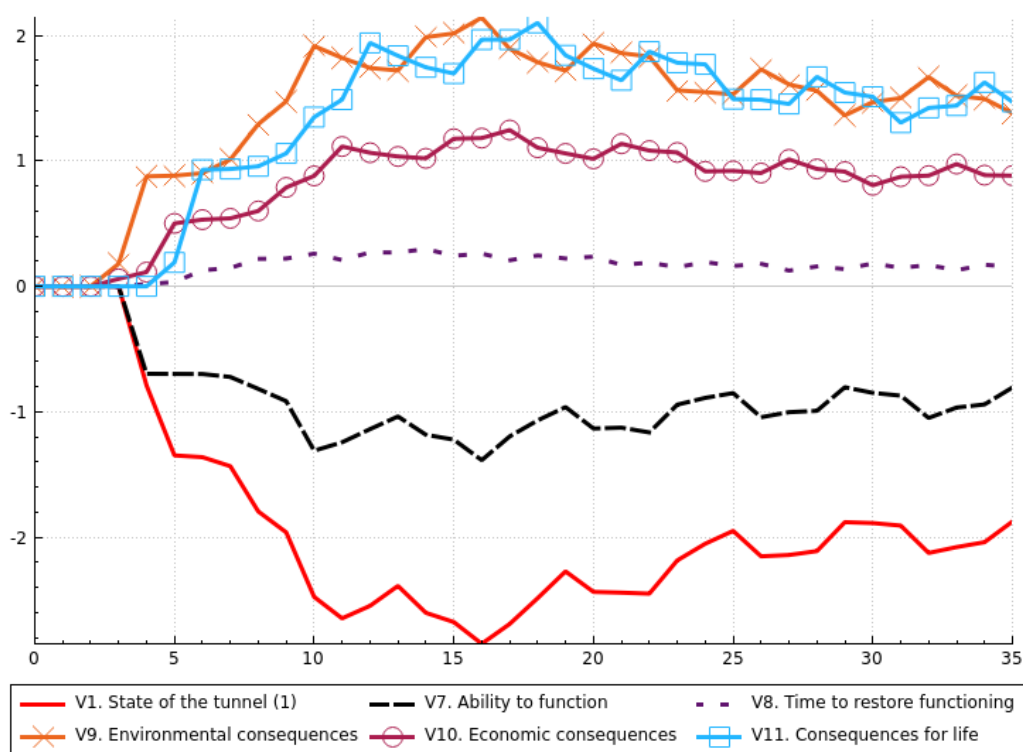


Рис. 4.35 – Сценарій реалізації загрози сейсмічного характеру для тунелю 1 після побудови когнітивної моделі

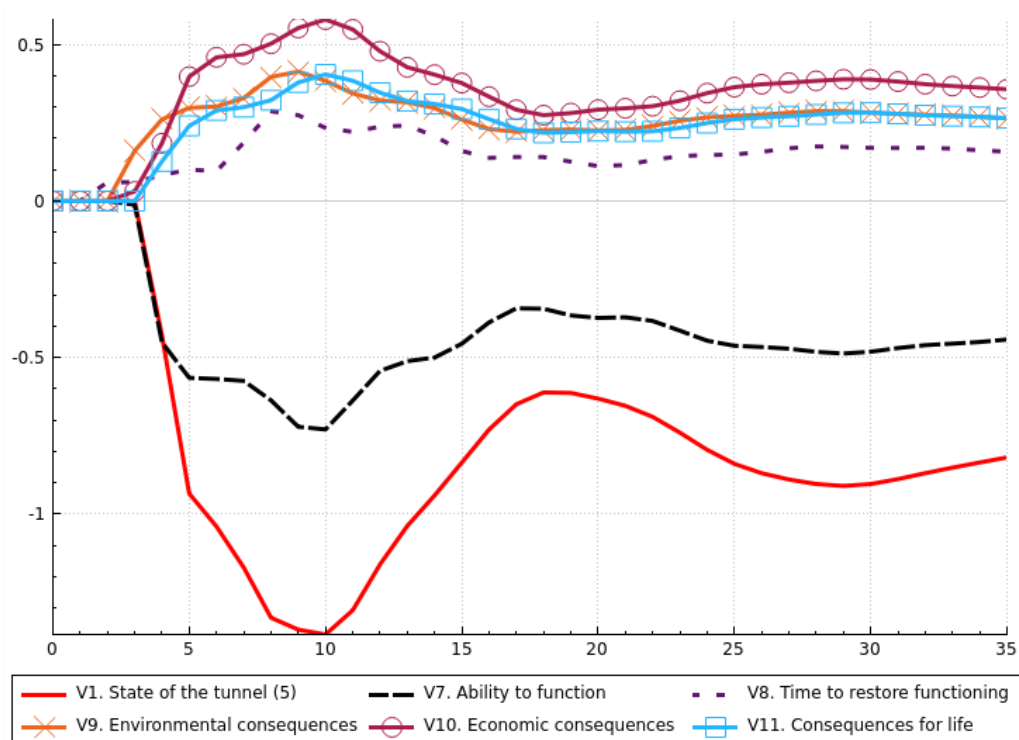


Рис. 4.36 – Сценарій реалізації загрози сейсмічного характеру для тунелю 5 після побудови когнітивної моделі

Таблиця 4.36 – Сценарій №4. Порівняння результатів моделювання для тунелів 1 і 5

Назва вершини (V_i)	Значення V_i тунель 1	Значення V_i тунель 5	Різниця (%)
V_1 . State of the tunnel	-1.8756	-0.81923	56.32
V_7 . Ability to function	-0.80648	-0.4424	45.14
V_8 . Time to restore functioning	0.15526	0.15725	1.26
V_9 . Environmental consequences	1.3822	0.26425	80.88
V_{10} . Economic consequences	0.88302	0.3568	59.59
V_{11} . Consequences for life	1.4718	0.26469	82.02

Як і в сценарії №3, сценарій №4 демонструє перевагу тунелю 5 майже в усіх аспектах. Це обґрунтовується ризиками, що несуть за собою сейсмічні загрози для підземних тунелів. Окрім загроз, що можуть додаватися до сейсмічних загроз (ризики обвалів та сходів порід), підземні вібрації можуть створювати мікропошкодження в тунельних конструкціях. Якщо брати ділянку тунеля 5, що

проходить вздовж р. Дніпро, сильні підземні удари є загрозою для такого типу конструкції (як і для більшості тунелів біля водойм, через ризики порушення герметичності таких конструкцій, що є прямою загрозою через високу вологість порід), проте, у випадку з м. Київ, що не входить до сейсмічно активної зони, підземні вібрації з невисокими амплітудами становлять більшу загрозу для тунелю 1, оскільки подібні загрози мають кумулятивний ефект, що значно підсилює загрози пов'язані за сценарієм №3 та додаткові ризики пов'язані з мікропошкодженнями самого тунелю. На тунель 5 підземні вібрації мають менший вплив, хоча час на обслуговування конструкцій приблизно рівний для двох тунелів. Це обґрунтовується необхідністю профілактики для ділянки тунеля 5, що проходить повз р. Дніпро, що є необхідністю для даних типів тунелів, перед відновленням експлуатації. Мікротріщини, що можуть виникати внаслідок землетрусів, можуть впливати на герметичність тунелю. Іноді такий сценарій може виникнути і без землетрусів у випадку неякісних проєктних рішень та будівельно-монтажних робіт. Прикладом є аварія на синій гілці метро м. Києва у листопаді 2023, на відновлення якої знадобилося 9 місяців.

4.16 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проведено практичне застосування розробленої модифікованої методології когнітивного моделювання для оцінювання планування підземної критичної інфраструктури м. Києва. На основі проведеного дослідження отримано наступні результати:

1. Проаналізовано стратегічні плани розвитку підземної критичної інфраструктури Києва, зокрема Генеральний план міста, що передбачає будівництво 8 автомобільних тунелів загальною довжиною понад 20 км. Систематизовано інженерно-геологічні, структурно-функціональні фактори та класифіковано ризики підземного будівництва, включаючи ризики військового характеру.

2. Побудовано когнітивні карти двох тунелів: тунелю 1 (що проходить під Ботанічним садом НАН України від Наддніпровського шосе до вулиці Саперно-Слобідської) та тунелю 5 (що проходить через р. Дніпро від площі перемоги до Броварського проспекту).
3. Застосовано методи симпліціального аналізу для обґрунтування структурної цілісності когнітивних карт підземної інфраструктури. Побудовано примальні та дуальні симпліціальні комплекси K_{V_Y} та K_{V_X} , проведено q -аналіз та обчислено структурні Q -вектори. Вперше проведено аналіз ексцентриситетів вершин когнітивної карти. Виявлено, що вихідні когнітивні карти мають вершини з ексцентриситетом ∞ , що свідчить про структурну нецілісність та обмеження керованості системи.
4. Вперше застосовано методи пошуку та аналізу спільнот (Louvain, Leiden, Greedy Modularity, Walktrap, Leiden CPM) до когнітивних карт для обґрунтування кількісних вагових характеристик. Обчислено модулярність та внутрішню щільність спільнот ρ_{in} . Виявлено спільноти, що побудовано з елементів системи без тісного взаємовпливу, що вказує на некоректність деяких кількісних вагових коефіцієнтів. Метод Leiden CPM дозволив ідентифікувати вершини, видалення яких підвищує внутрішню щільність спільнот.
5. На основі результатів симпліціального аналізу та аналізу спільнот проведено перебудову когнітивних карт тунелів 1 і 5. Після перебудови усі вершини комплексів K_{V_Y} та K_{V_X} мають скінченні значення ексцентриситету, що підтверджує структурну цілісність нових когнітивних карт.
6. Побудовано достовірно обґрунтовані когнітивні моделі тунелів 1 і 5 шляхом приведення когнітивних карт до структурної та чисельної стійкості з урахуванням даних, що отримано з результатів симпліціального аналізу, та аналізу спільнот і модулярності.
7. Проведено імпульсне когнітивне моделювання для побудови сценаріїв при чотирьох типах загроз: терористична атака, реалізація техногенних загроз,

зсуви порід та сейсмічні загрози. Порівняльний аналіз показав, що тунель 5 є більш стійким до всіх досліджуваних загроз, окрім терористичних, тоді як тунель 1 є більш вразливим до техногенних і природних загроз, та має більший вплив на наслідки для оточуючого середовища та життєдіяльності у випадку реалізації загроз даного характеру. Тунель 5 потребує дещо більшого часу на відновлення, що обґрунтовується довжиною та складністю локації тунеля, оскільки частина тунелю проходить під р. Дніпро.

8. Результати моделювання підтверджують практичну цінність розробленої модифікованої методології для оцінювання планування підземної критичної інфраструктури великих міст в умовах невизначеності.

Результати четвертого розділу опубліковано в роботах [61–63, 88].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову проблему розроблення модифікованої методології оцінювання планування підземної критичної інфраструктури великих міст на основі когнітивного моделювання в умовах багатофакторної невизначеності. Основні результати та висновки дисертаційної роботи:

- Проведено комплексний аналіз сучасного стану планування підземної інфраструктури мегаполісів. Систематизовано світовий досвід на прикладі Китаю, Німеччини, Фінляндії та Індії. Виявлено спільні тенденції: інтеграція підземного планування в систему містобудівного регулювання, розвиток нормативно-правової бази, застосування цифрових технологій та посилення уваги до врахування ризиків. Обґрунтовано необхідність застосування когнітивного моделювання для аналізу складних систем факторів в умовах невизначеності.
- Наведено теоретичні основи когнітивного моделювання складних систем. Обґрунтовано застосування двоетапного підходу, що включає процес передбачення та когнітивне моделювання. Наведено формальне визначення когнітивної карти як знаково-орієнтованого графа $G = \langle V, E \rangle$ та функціонального графа $\Phi = \langle G, X, F(X, E), \Theta \rangle$. Визначено етапи розробки когнітивної моделі: побудова когнітивної карти, обґрунтування структурної стійкості, обґрунтування чисельної стійкості, симпліціальний аналіз та аналіз модулярності.
- Наведено методи аналізу структурної та чисельної стійкості когнітивних карт. Наведено методи аналізу структурної стійкості на основі дослідження циклів позитивного та негативного зворотного зв'язку. Розглянуто методи аналізу чисельної стійкості на основі критерію Ляпунова та зв'язок власних чисел матриці з характером динамічної поведінки системи. Описано проце-

дуру приведення когнітивної моделі до стійкого стану шляхом коригування зв'язків вагових коефіцієнтів.

- Наведено методи структурного аналізу когнітивних карт на основі симпліціального аналізу. Представлено теоретичні основи, включаючи поняття симплексів, симпліціальних комплексів, q -зв'язності та ексцентриситету. Показано, що ці інструменти дозволяють оцінити багатовимірну структуру зв'язків у когнітивній карті та виявити ізольовані або слабо інтегровані елементи системи.
- Обґрунтовано застосування методів аналізу спільнот для структурного аналізу когнітивних карт. Детально описано алгоритми виявлення спільнот: Greedy Modularity, Walktrap, Louvain, Leiden та Leiden CPM з аналізом їх обчислювальної складності та особливостей застосування. Обґрунтовано застосування аналізу спільнот для обґрунтування кількісних вагових характеристик когнітивної карти, виявлення функціональних підсистем та сприяння досягненню структурної стійкості моделі.
- Проведено практичне застосування розробленої методології для оцінювання планування підземної критичної інфраструктури м. Києва. Проаналізовано стратегічні плани розвитку підземної інфраструктури. Систематизовано інженерно-геологічні, структурно-функціональні фактори та класифіковано ризики підземного будівництва, включаючи ризики військового характеру.
- Побудовано когнітивні карти двох тунелів: тунелю 1 (що проходить під Ботанічним садом НАН України від Наддніпровського шосе до вулиці Саперно-Слобідської) та тунелю 5 (що проходить через р. Дніпро від площі Перемоги до Броварського проспекту). Застосовано методи симпліціального аналізу для обґрунтування структурної цілісності когнітивних карт. Побудовано примальні та дуальні симпліціальні комплекси, проведено q -аналіз та обчислено структурні Q -вектори.

- Вперше проведено аналіз ексцентриситетів вершин когнітивної карти підземної інфраструктури. Виявлено, що вихідні когнітивні карти мають вершини з ексцентриситетом ∞ , що свідчить про структурну нецілісність та обмеження керованості системи. Вперше застосовано методи пошуку та аналізу спільнот до когнітивних карт підземної інфраструктури. Обчислено модулярність та внутрішню щільність спільнот. Метод Leiden CPM дозволив ідентифікувати вершини, видалення яких підвищує внутрішню щільність спільнот.
- На основі результатів симпліціального аналізу та аналізу спільнот проведено перебудову когнітивних карт тунелів 1 і 5. Після перебудови усі вершини симпліціальних комплексів мають скінченні значення ексцентриситету, що підтверджує структурну цілісність нових когнітивних карт. Побудовано когнітивні моделі тунелів шляхом приведення когнітивних карт до структурної та чисельної стійкості.
- Проведено імпульсне когнітивне моделювання для побудови сценаріїв при чотирьох типів загроз: терористична атака, реалізація техногенних загроз, зсуви порід та сейсмічні загрози. Порівняльний аналіз показав, що тунель 5 є більш стійким до всіх досліджуваних загроз, окрім терористичних, тоді як тунель 1 є більш вразливим до техногенних і природних загроз та має більший вплив на наслідки для навколишнього середовища у випадку реалізації загроз. Тунель 5 потребує дещо більшого часу на відновлення, що обґрунтовується довжиною та складністю локації тунелю.

Результати дисертаційного дослідження мають наукову та практичну цінність. Розроблена модифікована методологія забезпечує системний підхід до аналізу складних взаємозв'язків між факторами ризику при оцінюванні планування підземної критичної інфраструктури. Запропоновані методи симпліціального аналізу та аналізу спільнот дозволяють обґрунтовувати структурну цілісність когнітивних карт та виявляти некоректності у кількісних вагових характеристиках, що надає можливість розробити достовірну обґрунтовану модель когнітивної

карти, на базі якої проводиться когнітивне імпульсне моделювання та будуються бажані сценарії розвитку критичного підземного будівництва. Побудовані сценарії надають інформаційну підтримку для прийняття рішень щодо доцільності побудови тунельної конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Urbanization Prospects 2018: Highlights. United Nations, New York, 2019. URL: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>
2. Durmisevic S. The future of the underground space // *Cities*. – 1999. – Vol. 16, No. 4. – P. 233–245. DOI: 10.1016/S0264-2751(99)00022-0
3. von der Tann L., Ritter S., Hale S. et al. From urban underground space (UUS) to sustainable underground urbanism (SUU): shifting the focus in urban underground scholarship // *Land Use Policy*. – 2021. – Vol. 109. – 105650. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105650
4. Sterling R., Admiraal H., Bobylev N. et al. Sustainability issues for underground space in urban areas // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Urban Design and Planning*. – 2012. – Vol. 165, No. 4. – P. 241–254. DOI: 10.1680/udap.10.00020
5. Bobylev N. Mainstreaming sustainable development into a city's Master plan: a case of Urban Underground Space use // *Land Use Policy*. – 2009. – Vol. 26, No. 4. – P. 1128–1137. DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.02.003
6. Chen Z.-L., Chen J.-Y., Liu H., Zhang Z.-F. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: evaluation and analysis // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2018. – Vol. 71. – P. 253–270. DOI: 10.1016/j.tust.2017.08.027
7. Bartel S., Janssen G. Underground spatial planning – Perspectives and current research in Germany // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2016. – Vol. 55. – P. 112–117. DOI: 10.1016/j.tust.2015.11.023

8. Rönkä K., Ritola J., Rauhala K. Underground space in land-use planning // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 1998. – Vol. 13, No. 1. – P. 39–49. DOI: 10.1016/S0886-7798(98)00029-7
9. Sterling R., Carmody J., Rockenstein W.H. Case study of life safety standards for a large mined underground space facility in Minneapolis, Minnesota // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 1992. – Vol. 7, No. 2. – P. 119–125. DOI: 10.1016/0886-7798(92)90041-F
10. Li X.Z., Li C., Parriaux A. et al. Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2016. – Vol. 55. – P. 59–66. DOI: 10.1016/j.tust.2016.02.003
11. Pankratova N.D., Savchenko I.O., Haiko H.I., Kravets V.G. System approach to planning urban underground development // *International Journal «Information Content and Processing»*. – 2019. – Vol. 6, No. 1. – P. 3–17.
12. Kremin N., Andreychuk Y. Geocological risks of underground space development in the central part of L'viv (Ukraine) // *Proceedings of the Conference: Constructive Geography and Cartography, Ivan Franko National University of L'viv*. – 2020. – P. 15–20.
13. Goel R.K. Status of tunnelling and underground construction activities and technologies in India // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2001. – Vol. 16, No. 2. – P. 63–75. DOI: 10.1016/S0886-7798(01)00035-9
14. Bhutani R., Ram S., Ravinder K. Impact of Metro Rail Construction Work Zone on Traffic Environment // *Transportation Research Procedia*. – 2016. – Vol. 17. – P. 586–595. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.113
15. Eskesen S.D., Tengborg P., Kampmann J., Veicherts T.H. Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2 // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2004. – Vol. 19, No. 3. – P. 217–237. DOI: 10.1016/j.tust.2004.01.001

16. ITA-AITES, IMIA. A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works. – 3rd ed. – International Tunnelling and Underground Space Association, 2023.
17. Thewes M., Kamarianakis S. Decision analysis for underground infrastructure using uncertain data and fuzzy scales // *Proceedings of the World Tunnel Congress* (Geneva, 2013). – CRC Press, 2013. DOI: 10.1201/b14769
18. Stepien M., Jodehl A., Vonthron A. et al. An approach for cross-data querying and spatial reasoning of tunnel alignments // *Advanced Engineering Informatics*. – 2022. – Vol. 54. – 101728. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101728
19. Vollmann G., Stepien M., Riepe W. et al. Use of BIM for the optimized operation of road tunnels: modelling approach, information requirements, and exemplary implementation // *Geomechanik und Tunnelbau*. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – P. 167–174. DOI: 10.1002/geot.202100074
20. Pankratova N.D., Pankratov V.A. System approach to the underground construction objects planning based on foresight and cognitive modelling methodologies // *System Research and Information Technologies*. – 2022. – No. 2. – P. 7–25. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2022.1.01
21. Terzaghi K. Rock defects and loads on tunnel supports // *Rock Tunneling with Steel Supports* / eds. R.V. Proctor, T.L. White. – Commercial Shearing and Stamping Company, Youngstown, 1946. – P. 17–99.
22. Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice. – 3rd ed. – Wiley-Interscience, New York, 1996. – 549 p. ISBN 978-0471086581.
23. Peck R.B. Deep excavations and tunneling in soft ground // *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volume*, Mexico City. – 1969. – P. 225–290.
24. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. – Wiley-Interscience, New York, 1989. – 272 p. ISBN 978-0471601722.

25. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // *Rock Mechanics*. – 1974. – Vol. 6, No. 4. – P. 189–236. DOI: 10.1007/BF01239496
26. Deere D.U. Technical description of rock cores for engineering purposes // *Rock Mechanics and Engineering Geology*. – 1964. – Vol. 1, No. 1. – P. 17–22.
27. Hoek E., Brown E.T. Practical estimates of rock mass strength // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1997. – Vol. 34, No. 8. – P. 1165–1186. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X
28. Rehman H., Ali W., Naji A.M. et al. Review of Rock-Mass Rating and Tunneling Quality Index Systems for Tunnel Design: Development, Refinement, Application and Limitation // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8, No. 8. – 1250. DOI: 10.3390/app8081250
29. González de Vallejo L.I. Rock Mass Classification Systems: A Useful Rock Mechanics Tool, Often Misused // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2024. – Vol. 57. – P. 8965–8979. DOI: 10.1007/s00603-024-04087-y
30. Kim K., Jeon S., Ryu H. et al. Evaluating the relationship between RMR and Q-system for improved classification of faulted rocks and weak rocks // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – 17252. DOI: 10.1038/s41598-025-01985-1
31. Li S., Liu B., Xu X. et al. An overview of ahead geological prospecting in tunneling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2017. – Vol. 63. – P. 69–94. DOI: 10.1016/j.tust.2016.12.011
32. Gong Q., Yin L., Ma H., Zhao J. TBM tunnelling under adverse geological conditions: an overview // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2016. – Vol. 57. – P. 4–17. DOI: 10.1016/j.tust.2016.04.002
33. Rankin W.J. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects // *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*. – 1988. – Vol. 5, No. 1. – P. 79–92. DOI: 10.1144/GSL.ENG.1988.005.01.06

34. Yuan C., Wang X., Wang N., Zhao Q. Study on the Effect of Tunnel Excavation on Surface Subsidence Based on GIS Data Management // *Procedia Environmental Sciences*. – 2012. – Vol. 12. – P. 1387–1392. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.438
35. Phoon K.-K., Ching J., Shuku T. Challenges in data-driven site characterization // *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. – 2022. – Vol. 16, No. 1. – P. 7–22. DOI: 10.1080/17499518.2022.2087884
36. Einstein H.H. Risk and risk analysis in rock engineering // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 1996. – Vol. 11, No. 2. – P. 141–155. DOI: 10.1016/0886-7798(96)00014-4
37. Einstein H.H., Labreche D.A., Markow M.J., Baecher G.B. Decision analysis applied to rock tunnel exploration // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. – 1978. – Vol. 104, No. GT7. – P. 971–991.
38. Karam K.S., Karam J.S., Einstein H.H. Decision analysis applied to tunnel exploration planning. I: Principles and case study // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2007. – Vol. 133, No. 5. – P. 344–353. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:5(344)
39. Karam K.S., Karam J.S., Einstein H.H. Decision analysis applied to tunnel exploration planning. II: Consideration of uncertainty // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2007. – Vol. 133, No. 5. – P. 354–363. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:5(354)
40. Sousa R.L., Einstein H.H. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2012. – Vol. 27, No. 1. – P. 86–100. DOI: 10.1016/j.tust.2011.07.003
41. Koothathongsumrit N., Meethom W. Risk analysis in underground tunnel construction with tunnel boring machines using the Best–Worst method and data

envelopment analysis // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, No. 1. – e23486. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e23486

42. Wu P., Lin F., Huang J. et al. Multiscale evaluation of tunnel construction safety risk: a case study of an offshore tunnel construction in Ningbo // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2024. – Vol. 71. – 108. DOI: 10.1186/s44147-024-00441-7

43. Wang Z., Jiang T., Li Z. Risk assessment of underground tunnel engineering based on Pythagorean fuzzy sets and Bayesian networks // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14. – 2897. DOI: 10.3390/buildings14092897

44. Xu N., Guo C., Wang L. A three-stage dynamic risk model for metro shield tunnel construction // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2024. – Vol. 28. – P. 503–516. DOI: 10.1007/s12205-023-0655-2

45. Han B., Jia W., Feng W. Safety risk assessment of loess tunnel construction under complex environment based on game theory-cloud model // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – 12249. DOI: 10.1038/s41598-023-39377-y

46. Sun H., Liu K., Li X. et al. Construction risk probability assessment of shield tunneling projects in karst areas based on improved two-dimensional cloud model // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2024. – Vol. 154. – 106086. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106086

47. Andersen L., Nielsen S.R.K. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2005. – Vol. 25, No. 7–10. – P. 701–716. DOI: 10.1016/j.soildyn.2005.04.007

48. Інструментарій планування підземної інфраструктури великих міст для забезпечення мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору на основі системної методології: звіт про НДР (заклучний) / Н.Д. Панкратова, Г.І. Гайко, Д.О. Мусієнко [та ін.]; КПП ім. Ігоря Сікорського. – № держреєстрації 0120U104941, 0121U111131. – Київ, 2021. – 256 с.

49. Auersch L. Mitigation of railway induced vibration at the track, in the transmission path through the soil and at the building // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 199. – P. 2312–2317. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.192
50. Berta G. Blasting-induced vibration in tunnelling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 1994. – Vol. 9, No. 2. – P. 175–187. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90029-9
51. Colaço A., Costa P.A., Amado-Mendes P. et al. Mitigation of vibrations and re-radiated noise in buildings generated by railway traffic: a parametric study // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 199. – P. 2627–2632. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.394
52. Connolly D., Giannopoulos A., Forde M.C. Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2013. – Vol. 46. – P. 13–19. DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.12.003
53. Coulier P., Cuéllar V., Degrande G., Lombaert G. Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 77. – P. 238–253. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.04.007
54. Yang W., Hussein M.F.M., Marshall A.M. Centrifuge and numerical modelling of ground-borne vibration from an underground tunnel // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2013. – Vol. 51. – P. 23–34. DOI: 10.1016/j.soildyn.2013.04.003
55. Stille H., Palmström A. Principles of Risk-Based Rock Engineering Design // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2019. – Vol. 52. – P. 4621–4637. DOI: 10.1007/s00603-019-01962-x
56. Feng S., Chen Z., Luo H. et al. Tunnel boring machines (TBM) performance prediction: A case study using big data and deep learning // *Tunnelling*

and Underground Space Technology. – 2021. – Vol. 110. – 103636. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103636

57. Li J., Li P., Guo D. et al. Advanced prediction of tunnel boring machine performance based on big data // *Geoscience Frontiers*. – 2021. – Vol. 12, No. 1. – P. 331–338. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.02.011

58. Pan Y., Wang Z., Sun L., Chen J.-J. Dynamic prediction and multi-objective optimization on driving position of tunnel boring machine (TBM): an automated deep learning approach // *Acta Geotechnica*. – 2024. – Vol. 19, No. 8. – P. 5611–5636. DOI: 10.1007/s11440-024-02271-6

59. Yang H., Song K., Zhou J. Automated recognition model of geomechanical information based on operational data of tunneling boring machines // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2022. – Vol. 55. – P. 1499–1516. DOI: 10.1007/s00603-021-02723-5

60. Armaghani D.J., Mohamad E.T., Narayanasamy M.S. et al. Development of hybrid intelligent models for predicting TBM penetration rate in hard rock condition // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2017. – Vol. 63. – P. 29–43. DOI: 10.1016/j.tust.2016.12.009

61. Pankratova N.D., Musiienko D.I. Study of the underground tunnel planning. Cognitive modelling // *System Research and Information Technologies*. – 2023. – No. 1. – P. 37–50. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2023.1.03

62. Pankratova N., Pankratov V., Musiienko D. Analysis and Modelling of the Underground Tunnel Planning in Uncertainty Conditions // *System Analysis and Artificial Intelligence. Studies in Computational Intelligence*. Vol. 1107. – Springer, Cham, 2023. – P. 63–81. DOI: 10.1007/978-3-031-37450-0_4

63. Musiienko D.I. Planning underground infrastructure in large cities under uncertainty // *Problems of Applied Mathematics and Mathematical Modeling (PMMM)*. – 2024. – P. 141–150. DOI: 10.15421/322415

64. Pankratova N.D., Gorelova G.V., Pankratov V.A. The Strategy of Underground Construction Objects Planning Based on Foresight and Cognitive Modelling Methodologies // *System Analysis & Intelligent Computing. Studies in Computational Intelligence*. Vol. 1022. – Springer, 2022. – P. 69–91. DOI: 10.1007/978-3-030-94910-5_5

65. Pankratova N.D., Gorelova G.V., Pankratov V.A. Study of the plot suitability for underground construction: cognitive modelling // *ISDMCI 2020: Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making*. – 2020. – P. 246–264. DOI: 10.1007/978-3-030-54215-3_16

66. Pankratova N.D., Haiko H.I., Savchenko I.O. Morphological model for underground crossings of water objects // *System Research and Information Technologies*. – 2021. – No. 4. – P. 53–67. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04

67. Roberts F.S. *Graph Theory and its Applications to Problems of Society*. – SIAM, Philadelphia, 1978. – 122 p.

68. Інноваційне розвиток соціально-економічних систем на основі методологій предвидення і когнітивного моделювання : колективна монографія / под ред. Г.В. Горелової, Н.Д. Панкратової. – Київ : Наукова думка, 2015. – 464 с.

69. Панкратова Н.Д., Савченко І.О., Гайко Г.І. Розвиток підземного урбанізму як система альтернативних проектних конфігурацій. – Київ : Наукова думка, 2019.

70. Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. *System Analysis: Theory and Applications*. – Springer, 2007. – 475 p.

71. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. – McGraw-Hill, New York, 1980. – 287 p.

72. Панкратова Н.Д., Недашківська Н.І. Моделі і методи аналізу ієрархій: Теорія. Застосування. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – 372 с.

73. Панкратова Н.Д., Недашківська Н.І., Гайко Г.І., Білецький В.С. Оцінювання моделей розвитку підземної транспортної інфраструктури методом ВОСР з урахуванням екологічних і техногенних ризиків // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. – 2021.

74. Панкратова Н.Д., Малафєєва Л.І. Метод Делфі. Методологія та застосування. – Київ: Наукова думка. – 248 с.

75. Pankratova N.D., Pankratov V.A. Modeling of scenarios for underground construction planning based on foresight and cognitive modeling methodologies // *Доповіді НАН України*. – 2021. – № 5. – С. 18–24. DOI: 10.15407/dopovidi2021.05.018

76. 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.: Y.P. Kondratenko et al. – River Publishers, 2021. – P. 257–288.

77. Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. Визначення пріоритетів розвитку підземної інфраструктури мегаполісів на основі системної методології // *Геоінженерія*. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – Вип. 6. – С. 17–27.

78. 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*. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 127–134.

79. Semyon Aranovich Gershgorin. Über die Abgrenzung der Eigenwerte einer Matrix. - 1931. - P. 749–754

80. Atkin R.H. Mathematical Structure in Human Affairs. – London: Heinemann, 1974. – 212 p. ISBN 0-435-82025-7.

81. Atkin R.H. Combinatorial Connectivities in Social Systems: An Application of Simplicial Complex Structures to the Study of Large Organizations. – Basel: Birkhäuser, 1977. – 245 p. DOI: 10.1007/978-3-0348-5750-5

82. Casti J.L. Connectivity, Complexity and Catastrophe in Large-Scale Systems. – Chichester: John Wiley & Sons, 1979. – 203 p. ISBN 0-471-27661-8.
83. Newman M.E.J. Modularity and community structure in networks // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2006. – Vol. 103, No. 23. – P. 8577–8582. DOI: 10.1073/pnas.0601602103
84. Clauset A., Newman M.E.J., Moore C. Finding community structure in very large networks // *Physical Review E*. – 2004. – Vol. 70. – 066111. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.066111
85. Pons P., Latapy M. Computing Communities in Large Networks Using Random Walks // *Computer and Information Sciences – ISCIS 2005. Lecture Notes in Computer Science*. – Vol. 3733. – Springer, 2005. – P. 284–293. DOI: 10.1007/11569596_31
86. Blondel V.D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. – 2008. – P10008. DOI: 10.1088/1742-5468/2008/10/P10008
87. Traag V.A., Waltman L., van Eck N.J. From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – 5233. DOI: 10.1038/s41598-019-41695-z
88. Pankratova N.D., Musiienko D.I. Simplicial analysis and community detection in cognitive modelling of complex systems // *Problems of Applied Mathematics and Mathematical Modelling*. – 2025. – Vol. 25. – P. 195–211. DOI: 10.15421/322517
89. Fortunato S. Community detection in graphs // *Physics Reports*. – 2010. – Vol. 486, No. 3–5. – P. 75–174. DOI: 10.1016/j.physrep.2009.11.002
90. Girvan M., Newman M.E.J. Community structure in social and biological networks // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2002. – Vol. 99, No. 12. – P. 7821–7826. DOI: 10.1073/pnas.122653799

91. Генеральний план м. Києва. Основні положення. – Київ: Інститут генерального плану м. Києва, 2011.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Pankratova, N. D., Musiienko D. I. Study of the underground tunnel planning. Cognitive modelling. System research and information technologies. 2023. № 1. С. 37-50. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2023.1.03> (Scopus Q4). **Особистий внесок здобувача.** Здобувачем розроблено авторський програмний комплекс, що дозволяє в процесі моделювання імпульсів та аналізу отриманих результатів вводити регулюючі або збуджуючі впливи на будь-якому етапі моделювання. Це дає змогу коригувати сценарії в динаміці побудови моделі, визначаючи ефекти, що наближають процеси до бажаних. Розроблений системний підхід застосовується для дослідження надійності проектування підземних тунелів різних типів з метою вибору обґрунтованих сценаріїв їхнього майбутнього розвитку. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування та редагування висновків.
2. Pankratova N., Pankratov V., Musiienko D. Analysis and Modelling of the Underground Tunnel Planning in Uncertainty Conditions. System Analysis and Artificial Intelligence. Studies in Computational Intelligence // Eds. Zgurovsky M., Pankratova N. Cham: Springer, 2023. Vol 1107. P 63–81, https://doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0_4 (Scopus Q4). **Особистий внесок здобувача.** Здобувачем розроблено алгоритм для побудови чисельно стійкої когнітивної карти, вершини якої містять надійні дані, отримані на етапі передбачення. Застосування когнітивного імпульсного моделювання дає змогу будувати сценарії для підземних тунелів з урахуванням різних видів невизначеностей, аналізувати вплив на них будь-яких типів загроз, відбирати найбільш надійні з них та обґрунтовувати пріоритетність їх створення. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування. **Внесок співавтора В. Панкратова:** участь в обговоренні результатів.
3. Musiienko D.I. Planning underground infrastructure in large cities under uncertainty. Питання прикладної математики та математичного моделювання. 2024. № 24. С.141–150. <https://doi.org/10.15421/322415>

4. Pankratova N. D., Musiienko D. I. Simplicial analysis and community detection in cognitive modelling of complex systems. Питання прикладної математики та математичного моделювання. 2025. №, 25. С 195-211. <https://doi.org/10.15421/322517>.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем розроблено обґрунтування структурної цілісності когнітивних карт підземної інфраструктури на основі застосування методів симпліціального аналізу та аналізу срільнот. Побудовано примальні та дуальні симпліціальні комплекси та , проведено Q -аналіз та обчислено структурні Q -вектори, ексцентриситети вершин когнітивної карти. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування та редагування вступної частини.

У матеріалах конференцій:

5. Pankratova N.D., Musiienko D.I. Strategy of underground critical infrastructure planning based on cognitive modelling methodology. Міжнародна наукова конференція «Наукові тренди постіндустріального суспільства». Матеріали IV Міжнародної наукової конференції «Наукові тренди постіндустріального суспільства». (м. Суми 31 бер. 2023). Вінниця: Європейська наукова платформа. 2023. С. 141-145. <https://doi.org/10.36074/mcnd-31.03.2023> URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/31.03.2023/21>. **Особистий внесок здобувача.** Здобувачем розроблено програмний комплекс, який дозволяє в процесі когнітивного моделювання вводити регулюючі або збуджуючі впливи на вершини когнітивної карти. Це дає змогу створювати сценарії в ході побудови моделі, визначаючи ефекти, що наближають процеси до бажаних. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування.
6. Musiienko D. Cognitive modeling of energy infrastructure performance assessment. Mathematical support and software for intelligent systems (MSSIS-2023): Abstracts of the XXI International scientific and practical conference, Dnipro, November 22-24, 2023 / Under the general editorship of E.M. Kiseleva. – Dnipro: DNU, 2023. – 328 p.

7. Панкратова Н.Д., Панкратов В.А., Мусієнко Д.І., Синергія структур когнітивних моделей складних систем при динамічних навантаженнях. Перша всеукраїнська наукова конференція «Когнітивні дослідження: результати, виклики та перспективи» перспективи (CR-2024). Матеріали доповідей 1-ї Всеукраїнської наукової конференції «Когнітивні дослідження: результати, виклики та перспективи – 2024». (Київ. 24 травня 2024 р.), Київ: Видавництво «Каравела», 2024. С. 23-28 URL: <https://drive.google.com/file/d/1bjioYxbdjkejCoLaH2G9DwflXp5PmlDw/view>. **Особистий внесок здобувача.** Здобувачем розроблено дослідження когнітивної моделі складної системи, що проводиться на підставі різної теоретичної і практичної інформації, експертних та статистичних даних. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування. **Внесок співавтора В. Панкратова:** участь в обговоренні результатів.
8. Pankratova N.D., Musiienko D.I, Community analysis and modularity assessment in cognitive modelling of complex systems, Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС-2025): Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції. (Дніпро, 19-21, листоп. 2025). Дніпро: ДНУ, 2025. Р. 33-34. URL: <http://mpzis.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2025/11/%D0%9C%D0%9F%D0%97%D0%86%D0%A1-2025.pdf>. **Особистий внесок здобувача.** Здобувачем отримане значення модулярності $Q = 0,58510$, що свідчить про наявність чіткої структури спільнот та дозволяє припустити, що систему тунелів дійсно можна розглядати як сукупність окремих, але взаємопов'язаних функціональних модулів. **Внесок співавтора Н. Панкратової:** здійснено наукове консультування та редагування висновків.