

УДК 528.38/.41:[510.633.3+519.876.5-048.66]
DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.33.1057

ЛОГІКО-ЙМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДМОВ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ

БЄГІЧЕВ С. В.¹, канд. техн. наук, доц.,
ІШУТИНА Г. С.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
ТРЕГУБ О. В.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

Анотація. Достовірність та надійність результатів геодезичних і кадастрових робіт залежить головним чином від точності інструментів, кваліфікації спостерігача, його професіоналізму і надійності пунктів геодезичної мережі (ГМ). Як правило, у більшості випадків існує обґрунтований вибір відповідних за точністю геодезичних інструментів і залучають інженера-геодезиста високої кваліфікації для виконання певних видів геодезичних робіт. Проте щодо визначення вихідних пунктів для створення надійного геодезичного знімального обґрунтування можуть виникнути певні питання. Визначення надійних геодезичних пунктів для виконання інженерно-геодезичних робіт на основі методів оцінювання надійності – це актуальне наукове завдання сьогодення. **Мета роботи** – підібрати метод оцінювання надійності на основі аналізу існуючих та адаптувати для вирішення проблеми оцінювання надійності геодезичних мереж як одного з найважливіших параметрів, що характеризують їх стан. Оцінити надійність геодезичної мережі м. Дніпро шляхом побудови дерева відмов. Розрахувати динаміку інтенсивності відмов ГМ протягом 100-річного періоду її існування. Обчислити доцільну періодичність обстежень (моніторингу) ГМ залежно від інтенсивності відмов її елементів (геодезичних пунктів). **Методика.** Аналіз міжнародних і національних стандартів з оцінювання надійності, Стандарти України, де наведені методи оцінки надійності різних систем. Огляд методів для оцінювання надійності ГМ. Застосований дедуктивний метод з побудовою дерева відмов геодезичної мережі, в основі якого лежить логіко-ймовірнісна модель причинно-наслідкових зв'язків відмов системи з відмовами її елементів та іншими подіями. **Наукова новизна.** Встановлено оптимальний метод оцінки надійності ГМ. Побудовано дерево відмов ГМ у програмному засобі TopEvent FTA. Виконано оцінку надійності геодезичної мережі, обчислено інтенсивність відмов на різних етапах її функціонування, описано математичні вирази функцій відмов геодезичної мережі шляхом застосування булевих функцій. **Практична значимість.** Проаналізовано міжнародні та національні нормативні документи з оцінки надійності, Стандарти України, де наведені методи оцінювання надійності систем. Виконана оцінка надійності стану ГМ м. Дніпро допомагає обирати стабільні геодезичні пункти для створення локальних геодезичних мереж та знімального обґрунтування. Обґрунтовано доцільну періодичність моніторингу геодезичних пунктів. Використання надійних пунктів геодезичних мереж дозволить отримати достовірні дані спостережень, що значно підвищить якість інженерно-геодезичних робіт. **Результати.** Розглянуто функціонування геодезичної мережі м. Дніпро на побудованому послідовному дереві відмов. Застосовано булеві функції для опису математичних виразів функцій відмов геодезичної мережі, що включає 5 та 10 елементів.

Ключові слова: державна геодезична мережа; оцінка надійності; дерево відмов; моніторинг; оновлення геодезичних пунктів; булеві функції; метод мінімальних перерізів; триангуляція

LOGICAL-PROBABLIC MODELING OF FAILURES OF GEODESIC NETWORKS

БІЄНІЧЕВ С. В.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
ІШУТИНА Н. С.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

TREGUB O.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

Abstract. The credibility and reliability of the results of geodetic and cadastral works depends mainly on the accuracy of the instruments, the qualification of the observer, his professionalism and the reliability of the points of the geodetic network (GN). As a rule, in most cases, there is a well-founded choice of geodetic tools suitable for accuracy and the involvement of a highly qualified geodetic engineer to perform certain types of geodetic work. However, certain questions may arise regarding the determination of starting points for the creation of a reliable geodetic survey justification. The issue of selecting reliable geodetic points for performing engineering and geodetic works based on the application of reliability assessment methods is an urgent scientific problem today. *The purpose of the work* is to establish the optimal reliability assessment method based on the analysis of existing ones. Adapt this method to solve the problem of assessing the reliability of geodetic networks as one of the most important parameters characterizing its condition. Assess the reliability of the Dnipro geodetic network by constructing a fault tree. Calculate the dynamics of the intensity of GN failures during the 100-year period of its existence. Calculate the appropriate periodicity of surveys (monitoring) of GN depending on the intensity of failures of elements (geodetic points). *Methodology.* Analysis of international and national standards for reliability assessment, Standards of Ukraine, where the methods of system reliability assessment are given. Review of methods for assessing GN reliability. The deductive method with the construction of a geodetic network failure tree has been applied. This method is based on a logic-probabilistic model of cause-and-effect relationships of system failures with failures of its elements and other events. *Scientific novelty.* The optimal method of assessing the reliability of GN has been established. A GN failure tree has been built in the TopEvent FTA software tool. The reliability of the geodetic network has been evaluated, the intensity of failures at various stages of its operation has been calculated. Mathematical expressions of the failure functions of the geodetic network have been described by applying Boolean functions. *Practical value.* International and national regulatory documents and Standards of Ukraine of reliability assessment have been analyzed. In Standards the methods of system reliability assessment have been given. The performed assessment of the reliability of the state of the geodetic network of the city of Dnipro helps to choose stable geodetic points for the creation of local geodetic networks and survey justification. Reasonable periodicity of monitoring for the survey of geodetic points has been substantiated. The use of reliable points of geodetic networks will allow obtaining reliable observation data, which will significantly increase the quality of engineering and geodetic works. *Results.* The functioning of the geodetic network of the city of Dnipro on the constructed sequential tree of failures has been considered. Boolean functions to describe the mathematical expressions of the failure functions of the geodetic network, which includes 5 and 10 elements have been used.

Keywords: *state geodetic network; reliability assessment; Fault Tree; monitoring; update of geodetic points; Boolean functions; minimum sections; triangulation*

Постановка проблеми. Геодезичні мережі (ГМ) становлять основу, за допомогою якої вирішуються різні наукові та практичні питання. Вони використовуються в різних галузях сучасної науки, таких як аналіз деформації земної кори, моніторинг штучних споруд, встановлення та підтримка геопросторової системи відліку, картографування, землеустрій, геодезичний супровід цивільного будівництва тощо. Основні характеристики ГМ – точність визначення її пунктів та їх надійність. Одним із найважливіших компонентів для забезпечення якості геодезичної мережі стало використання надійних пунктів, які

будуть зберігати стабільність просторового положення протягом усього терміну існування мережі.

У Законі України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» визначено: «... державна геодезична мережа (ДГМ) – мережа геодезичних пунктів, що забезпечує поширення координат на територію держави і є вихідною для створення інших геодезичних мереж». «Геодезичний пункт – пристрій і (або) споруда для позначення на місцевості точок земної поверхні з відомими координатами і висотами» [1].

Механізм побудови ДГМ із застосуванням сучасних глобальних

навігаційних супутникових систем, строгих математичних методів оброблення даних та інформаційних технологій, а також традиційних геодезичних методів визначення Порядком побудови Державної геодезичної мережі [2]. В цьому Порядку наведена структура ДГМ, що включає геодезичну (планову), нівелірну (висотну) та гравіметричну мережі, пункти яких повинні бути суміщені або між якими встановлено надійний геодезичний зв'язок.

З впливу різних факторів (антропогенних та природних) пункти геодезичних мереж зазнають зміщень або знищень, втрачають стале положення і потребують відновлення. Моніторинг геодезичних пунктів ДГМ згідно з Порядком [2] «проводиться Держгеокадастром шляхом забезпечення систематичного та періодичного обстеження їх стану. Систематичне обстеження та оновлення геодезичних пунктів ДГМ здійснюються виконавцями геодезичних робіт на окремих територіях під час проведення топографо-геодезичних робіт, земельно-кадастрової зйомки, інженерно-геодезичних вишукувань, пов'язаних з використанням геодезичних пунктів ДГМ. Періодичне обстеження та оновлення геодезичних, гравіметричних пунктів і нівелірних реперів проводяться у міру потреби, але не рідше ніж один раз на 10 років, а на території міст і зон активної господарської діяльності – не рідше ніж один раз на п'ять років» [2].

Механізм обстеження та оновлення пунктів ДГМ наведений у Порядку [3], згідно з яким обстеження полягає у відшукуванні геодезичних пунктів на місцевості, визначенні стану їх центрів (реперів), зовнішнього оформлення та охоронних стовпів, а оновлення – це комплекс робіт із ремонту (заміни) складових їх елементів.

Отже, шляхом періодичного моніторингу геодезичних пунктів можна виявити їх стан (збереженість) і сталість їх положення. Шляхом оновлення можна відновити геодезичну мережу. Проте періодичність обстежень ДГМ у сучасних

умовах недостатня. Більшість пунктів ДГМ, що використовуються для створення локальних геодезичних мереж, назвати надійними немає підстав. Для виявлення ступеня надійності пунктів ГМ, що використовуються як вихідні, необхідно виконати математичний аналіз із застосуванням відповідних методів оцінки надійності.

Питання відбору надійних геодезичних пунктів, за результатами оцінювання їх надійності, для використання під час виконання інженерно-геодезичних робіт – актуальне наукове завдання сьогодення.

Виділення невирішеної проблеми.

Якість інженерно-геодезичних робіт і достовірність результатів геодезичних вимірів залежать від комплексного впливу факторів: впливу зовнішнього середовища, точності геодезичних приладів, особистих фізичних властивостей спостерігача, його професіоналізму і надійності пунктів знімального обґрунтування. Якщо позбутися впливу зовнішнього середовища повністю неможливо, то вплив інших складових чинників можна звести до мінімуму. Наразі є широкий спектр геодезичних приладів, які дозволяють виконувати кутові виміри з точністю до десятих значень секунд, лінійні виміри – до десятих часток міліметра, а перевищень – до півміліметра на один кілометр подвійного ходу. Висока професійна підготовка спеціалістів-геодезистів дозволяє якісно виконувати спостереження, а автоматизовані системи відрахування зовсім ліквідують «людський фактор». Проте, на жаль, фактор надійності знімального обґрунтування вивчений слабо.

Надійність, у загальному значенні, – це «властивість зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах експлуатації, технічного обслуговування, зберігання та транспортування» [4]. Під *надійністю геодезичних пунктів* будемо розуміти їх властивість зберігати стабільне просторове положення протягом усього часу експлуатації, тобто бути довговічними, та

зберігати точність їх положення відповідно до категорії геодезичної мережі [5].

Існує багато різних методів оцінювання надійності, які можна класифікувати:

- залежно від обраної моделі надійності (імовірнісні моделі надійності та структурно-імовірнісні);
- залежно від підходів до оцінювання (суб'єктивний, дискретний та комплексний);
- залежно від закону розподілу випадкових величин (методи, які ґрунтуються на припущенні щодо експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи, що описують спонтанні відмови незалежного випадкового характеру, та методи, які використовують гіпотези щодо безвідмовної роботи за нормальним розподілом, розподілом Релея і Вейбула, гама-розподілом).

Метод рівномірного розподілу надійності можна застосувати для оцінки надійності геодезичної мережі, як системи, що включає з однаковою надійністю n елементів (геодезичних пунктів), які рівномірно розташовані на певній території.

Це простий метод, який застосовують у разі відсутності експериментальних даних про надійність окремих підсистем:

$$R_G = \prod_{i=1}^n R_i = R_i^n, \quad (1)$$

де R_G – задана надійність; R_i – надійність i -ї підсистеми.

Надійність геодезичної мережі також можна визначити через інтенсивність відмов за умов експоненціального розподілу, застосувавши метод вагових коефіцієнтів:

$$\sum_{i=1}^r N_i K_i = \sum_{i=1}^r \frac{N_i K_i}{\lambda}, \quad (2)$$

де r – кількість блоків (елементів) різноманітних типів; K_i – коефіцієнт надійності i -го елемента; λ – інтенсивність відмов елемента, прийнятого як еталона; λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента; N_i – кількість елементів i -го типу.

За допомогою цього методу можна розрахувати надійність за обмежених даних.

Метод урахування впливу факторів на надійність дозволяє встановити залежність між надійністю ГМ та факторами впливу (природними та техногенними). Для цього

потрібно проаналізувати вплив кожного фактора на надійність геодезичних пунктів (чутливість елементів системи на ці впливи) та критичність відмов.

У *методі розрахунку надійності за даними про інтенсивність відмов* потрібно мати статистичні дані про надійність різних типів елементів, що розташовані в різних інженерно-геологічних умовах, в зонах із різним техногенним навантаженням, з різними умовами зовнішнього середовища (вологість, температурний режим тощо).

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^r \lambda_i N_i, \quad (3)$$

де λ_i – інтенсивність відмов (зміщень або знищень) елементів; N_i – кількість елементів.

Матричний метод розрахунку надійності ГМ застосований у публікаціях К. Третяка та І. Савчина [6; 7]; наведено матриці можливих станів геодезичної системи, що враховують усі можливі події:

$$P = \sum_{i=0}^k P(H_i). \quad (4)$$

Складність цього методу полягає у великому обсязі розрахунків. При цьому неможливо обчислити кількісні характеристики надійності як функції часу.

У методі *статистичного моделювання (метод Монте-Карло)* на ЕОМ багаторазово простежують процес функціонування ГМ, тобто створюють її математичну імовірнісну модель, яка відображає в реальному часі події відмови геодезичної мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Першим міжнародним стандартом із надійності, що з'явився у світі, був американський військовий стандарт MIL-HDBK-217 Part Stress & Part Count (оцінка надійності з навантаженням та без нього), в якому були зібрані всі можливі моделі, формули для оцінювання показників надійності з потужним довідковим матеріалом. З 1995 року цей стандарт перестав поновлюватися у зв'язку із великим об'ємом, проте цей нормативний документ і сьогодні залишається основним стандартом, що використовується у світі.

Остання ревізія цього стандарту була виконана італійським центром Reliability

Information Analysis Center (RIAC) в 2006 році за певними методиками розроблення моделей для попередньої оцінки надійності. На початку 2000-х років у США (після завершення існування стандарту MIL-217) з'явився стандарт Telcordia SR3332, Issue 1, May 2001, який вже не містив довідкових даних порівняно з MIL-217, а був спрямований на телекомунікаційні системи.

В Європі основним стандартом з надійності став FIDES Guide 2009 (Франція), який включає цілий ряд методологій з оцінювання надійності різних радіоелектронних систем. Перевага FIDES у тому, що цей стандарт враховує не тільки надійність окремих елементів, а й процеси проектування та експлуатації. У ньому використовуються більш прогресивні моделі, які враховують найбільшу кількість різних чинників, що впливають на надійність (з потрібною точністю і докладністю). Це основний стандарт з надійності у світі і Європейському союзі.

Стандарт NPRD-95 Non-electronic Parts Reliability Data (а також NPRD-2016) містить специфічні моделі для неелектронних частин, а стандарт NSWC-98 Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, запозичений у військового-морського флоту США, містить усі необхідні моделі для розрахунку механічного обладнання (різних видів двигунів).

До національних стандартів оцінки надійності можна віднести:

- британський стандарт BRT-British Telecom Module for reliability prediction based on British Telecom document HRD-4 or HRD-5 – спочатку був галузевим стандартом для телекомунікацій, який згодом розвинувся до національного стандарту з оцінки надійності різних електронних і телекомунікаційних систем, що містить значну частину зі Стандарту Telcordia, але має певні нюанси, що використовуються у Великобританії;

- французький стандарт RDF 2000 (UTEC 80810) – це попередник стандарту FIDES, містить частину стандарту MIL-217 з розвитком методів оцінювання надійності,

що використовувався як для електронних компонентів, так і інших;

- французький стандарт CNET RDF 93 Revision 2/95 використовувався для французької радіоелектронної продукції;

- німецький стандарт Siemens SN29500.1- Siemens reliability standard;

- китайський стандарт GJB299 – копія стандарту MIL-217.

Наведені міжнародні та національні стандарти реалізовані в програмному забезпеченні з оцінки надійності: ALD, ReliaSoft (Reliability Analysis and Management), IQ-Software, Windchill.

Комплект ПЗ ALD – це високоякісний продукт, який з'явився в результаті понад 30-річного досвіду у сфері розроблення та вдосконалення ПЗ з аналізу надійності та відмови безпеки для величезної кількості організацій цивільної та військової авіації, зв'язку, космічної промисловості та електроніки – лідерами у своїх галузях, серед яких THALES, BAE Systems, Lockheed Martin, NASA, MBDA, SAGEM та багато інших.

Програмне забезпечення ReliaSoft надає потужний набір програмних рішень для перевірки надійності, щоб полегшити комплексний набір методів інженерного моделювання та аналізу надійності.

Наразі в Україні діють певні нормативні документи [8–13], які з'явилися у 1994 році, що дублюють радянські стандарти 1980-х років, де чітко визначений термін «надійність» та наведені методи оцінювання надійності систем.

Стандарт ДСТУ 2860-94 [8] – це загальний стандарт, який містить усі терміни з оцінки надійності та регламентує показники для оцінки надійності.

Стандарт ДСТУ 2862-94 [9] більш практичний, дає методики розрахунку показників надійності та містить конкретні формули для розрахунку на етапі проектування надійності електронних, механічних та інших частин. Має досить оригінальні математичні моделі, особливо для систем зі старінням.

ДСТУ 2863-94 [10] – загальний стандарт, в якому міститься інформація як

підтримувати надійність від моменту проектування до моменту утилізації; які методи застосовуються на етапах проектування для підтримання чи забезпечення на етапі виробництва і експлуатації, зберігання.

У стандарті ДСТУ 2864-94 [11] наведено формули для експериментального розрахунку надійності.

Методи оцінювання показників надійності за експериментальними даними наведені у стандарті ДСТУ 3004-95 [12].

Стандарт ДСТУ 3433-96 [13] установлює вимоги до функцій розподілу випадкових величин, що використовуються як моделі відмов чи моделі надійності, наведені схеми розподілів відмов, а також методи вибору моделей відмов для конкретних ситуацій.

З різних ракурсів проблемі надійності геодезичних мереж присвячені праці як українських, так і закордонних вчених: К. Р. Третяка, І. Р. Савчина, С. В. Бегічева, Г. С. Ішутіної, Gilad Even-Tzur, Marcelo Tomio Matsuoka, Waldemar Odziemczyk, Amiri-Simkooei та ін.

У публікації [14] автор досліджував зовнішню надійність геодезичних мереж, що залежить від їх геометрії (кількість та розподіл базових точок мережі). У статті наведено результати чисельних експериментів, проведених із схематичною плановою мережею GPS. Ці результати свідчать, що достовірність скоригованих координат у геодезичній мережі залежить від геометричного розподілу точок, які визначають базу мережі.

Автори статті [15] розробили метод автоматичного вибору розташування контрольних точок геодезичних мереж на основі теорії надійності. Запропонований спосіб проектування геодезичної мережі (замкненого нівелірного ходу) базується на найменшому значенні максимальної зовнішньої надійності. Метод не потребує використання вектора спостереження моделі Гаусса – Маркова. Головна увага приділена геометричній конфігурації мережі (задана матрицею Якобі) та невизначеності спостережень (задана точністю приладу,

методами вимірювання та зовнішніми умовами). Мета роботи [15] – знаходження оптимального розташування контрольних точок, за якого було б зведено до мінімуму зміщення геодезичних пунктів.

Предметом дослідження в публікації [16] стала оптимізація розподілу точності спостережень для отримання збалансованих показників достовірності спостережень. Виконано перевірку придатності двох методів оптимізації, заснованих на алгоритмах оптимізації (імітації відпау, англ. Simulated annealing та оптимізації Хука – Дживса), для вирішення зазначеної проблеми. Аналітичний метод, запропонований Amiri-Simkooei, застосовувався як еталон. Ефективність вищезазначених методів перевірялася на двох змодельованих лінійно-кутових мережах. Завдяки прийнятному робочому часу та можливості визначення граничних умов на кінцевому розв'язку метод Хука – Дживса виявився найбільш придатним для розв'язання аналізованої задачі.

Мета роботи – підібрати метод оцінювання надійності на основі аналізу існуючих геодезичних мереж та адаптувати для вирішення проблеми оцінки надійності геодезичних мереж як одного з найважливіших параметрів, що характеризують їх стан. Оцінити надійність геодезичної мережі м. Дніпро шляхом побудови «дерева відмов». Розрахувати динаміку інтенсивності відмов ГМ протягом 100-річного періоду її існування. Обчислити доцільну періодичність обстежень (моніторингу) ГМ залежно від інтенсивності відмов її елементів (геодезичних пунктів).

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів. Геодезична мережа м. Дніпро зазнала значних змін протягом останніх 100 років. Триангуляційна мережа Катеринослава (1911–1915 рр.) складалася з 15 основних пунктів, 9 церков, визначених прямими засічками, та 26 точок, вирішених по задачі Потенота. Триангуляційна мережа протягом 1915–1918 рр. складалася з 12 опорних пунктів I класу, 5 – II класу і 34 – III класу (рис. 1) [5].

Тригонометрична мережа Дніпропетровська 1927 р. (рис. 2) складалася з 18 пунктів I класу, з них 14 шт. – взаємно пов'язаних у мережі I класу та 4 пункти полігонометрії вставлялися в мережу двосторонніми спостереженнями. Додаткові пункти тригонометричної мережі (до 90 штук) розбиті на дві групи: на пункти II класу (28 шт), визначені прямою засічкою, і пункти III класу (56 шт), визначені зворотною засічкою.

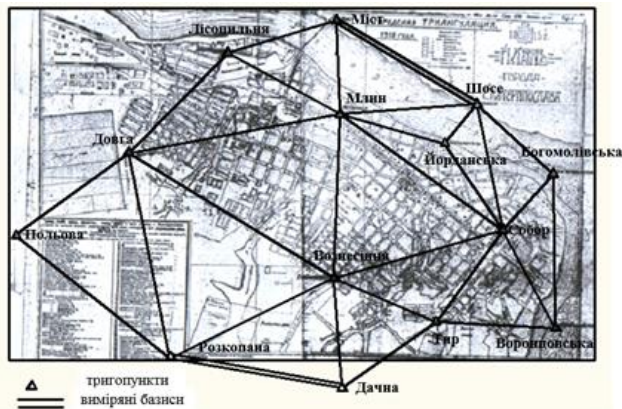


Рис. 1. Міська триангуляція Катеринослава 1916 року

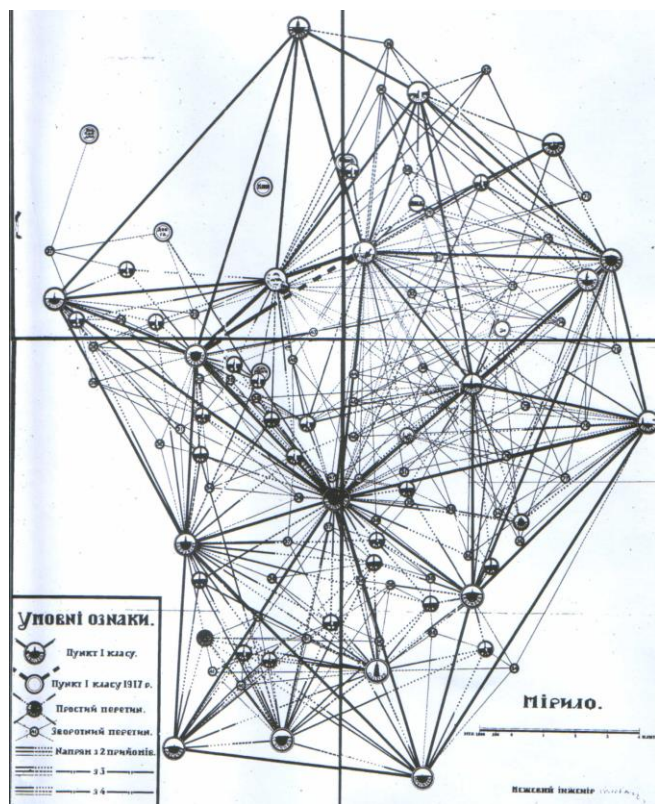


Рис. 2. Тригонометрична мережа 1927 року [5]

Основною проблемою у післявоєнний період (1943 – 1963 рр.) була незабезпеченість міста опорними геодезичними мережами, бо існуючі мережі (закладені в 1927–1929 рр.) значною мірою були знищені, особливо в період окупації і, крім того, за точністю вони не відповідали вимогам діючої Інструкції.

Натурне обстеження місцевості показало втрату майже 50 % всіх геодезичних пунктів. З обстежених 2 300 пунктів було виявлено лише 880 або 38 %, причому деякі райони міста, а також нові селища взагалі не мали геодезичного забезпечення. Із 900 стінних реперів збереглися близько 600, але окремі райони міста виявилися абсолютно позбавлені висотної основи.

У 1957 році в центрі міста і на південній його околиці було прокладено полігонометричні ходи I, II і III класу з прив'язкою їх до пунктів нової триангуляції.

Були побудовані мережі триангуляції II і III класу на площі 220 км². В міську мережу увійшли пункти державної геодезичної мережі I кл. – 4; II кл. – 10; нових пунктів II кл. – 8 шт.; нових пунктів III кл. – 39 шт.

На основі міської триангуляції II і III кл., прокладеної в 1952 – 1953 рр. на території земель міст і селищ: Ігренів, Придніпровськ, Березанівка, Сухачівка, Таромське, Краснопілля і Лоц-Кам'янка, які включені у склад міських земель м. Дніпропетровськ на площі – 31 км², побудовані мережі полігонометрії: 1-го розряду – 29,6 км (118 пунктів); 2-го розряду – 26,5 км (84 пункти); геодезичних ходів – 34,7 км (78 пунктів).

У період з 1963 по 1978 р. виникла необхідність у виконанні основних робіт із розвитку триангуляції, полігонометрії, висотного обґрунтування і аерофотозйомки у масштабі 1 : 2 000 і 1 : 5 000. Полігонометричні ходи прокладені по всій забудованій території. Переспостережено 35 пунктів державної триангуляції [5].

У 2011 році ДП «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії» виконав комплекс геодезичних робіт із подальшої модернізації міської геодезичної мережі м. Дніпропетровськ (рис. 3).

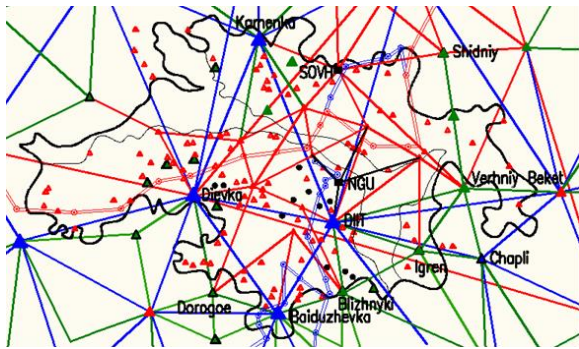


Рис. 3. Геодезична мережа 2012 р.[5]

Станом на 2013 рік було виявлено збереженість близько 60 % пунктів ДГМ і пунктів міської полігонометрії (162 пункти ДГМ I-IV класу, 32 пунктів міської полігонометрії).

Наразі постає завдання оцінити надійність сучасного стану ГМ.

Обчислимо доцільну періодичність моніторингу ГМ (систем) залежно від інтенсивності відмов геодезичних пунктів (елементів). Комплексний вплив різних факторів порушує природну рівновагу ґрунтового масиву і, як наслідок, викликає зміщення геодезичних знаків. Враховуючи те, що у створених умовах досягти 100 % надійності неможливо, приймемо ймовірність безвідмовної роботи ГМ принаймі 90 %, тобто $P(t) \geq 0,9$.

Розрахуємо максимально допустиму кількість геодезичних пунктів, які можуть зазнати зміщень і втратити стабільність свого положення. Нехай планово-висотна розмічувальна ГМ включає 10 пунктів, тоді із формули (5) знайдемо максимальну кількість пунктів, що втратили стале положення:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (5)$$

де N_0 – загальна кількість пунктів ГМ; $n(t)$ – кількість пунктів ГМ, які змістилися протягом деякого часу t .

Знайдемо максимальну кількість геодезичних пунктів, що можуть вийти з ладу зі збереженням надійного стану ГМ на рівні 90 %:

$$n(t) = N_0 \cdot (1 - P(t)) = 10 \cdot (1 - 0,9) = 1. \quad (6)$$

Отже, для забезпечення надійності ГМ допускається втрата стабільного положення лише одного пункту.

Розрахуємо, з якою періодичністю потрібно проводити моніторинг пунктів ГМ для своєчасного їх відновлення, якщо втрата надійності відбулась через $\Delta t = 6$ міс.

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{cpi} \cdot \Delta t_i}, \quad (7)$$

Для визначення періодичності контролю стану вихідних пунктів ГМ виведемо формулу:

$$t = -\frac{\ln P(t)}{\lambda}. \quad (8)$$

Якщо відбулась втрата надійності одного пункту через 5 місяців, то інтенсивність відмов буде:

$$\lambda = \frac{1}{(9,5 \cdot 5)} = 0,021.$$

Для такого значення інтенсивності відмов знайдемо доцільну періодичність моніторингу мережі:

$$t = \frac{-\ln 0,9}{0,021} \approx 5 \text{ міс.}$$

Дані з розподілу пунктів ДГМ м. Дніпро (Катеринослава 1802–1926 рр., Дніпропетровська 1926–2016 рр.) наведені у таблиці.

Таблиця

Геодезична мережа м. Дніпро

Роки	Триангуляція, клас			Σ
	I	II	III	
1911-1915	15	9	26	50
1915-1918	12	5	34	51
1927	18	28	56	102
1943-1953	4	10	39	53
1957	4	18	39	280
2013	пункти I-IV класу			162

Розглянемо інтервал часу 1927–1953 та 1957–2013 років. Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи ГМ та інтенсивність відмови на двох етапах: 1927–1953 та 1957–2013 рр. за формулою 5:

$$P(t)_{1927-1953} = \frac{102-49}{102} = 0,48;$$

$$P(t)_{1957-2013} = \frac{162 - 118}{162} = 0,27.$$

Розрахунки на період 1953–1957 рр. неможливо виконати у зв'язку з відновленням ГМ. Отже, ГМ у ці періоди була ненадійною внаслідок знищення геодезичних пунктів. Обчислимо інтенсивність відмови ГМ в ці періоди за формулою 7:

$$\lambda_{1927-1953} = \frac{49}{(77,5 \cdot 26)} = 0,024;$$

$$\lambda_{1957-2013} = \frac{118}{(221 \cdot 56)} = 0,001.$$

Періодичність контролю пунктів ГМ буде: $t = \frac{-\ln 0,9}{0,024} \approx 4,39$ років (тобто 1 раз у 4 роки).

Отже, якби виконали моніторинг у 1931 році та відновили ГМ, ймовірність безвідмовної роботи ГМ можна було б забезпечити на рівні 90 %. Як бачимо, протягом 26 років (1927–1953) було

втрачено близько 48 % пунктів, а протягом 1957–2013 рр. – 27 %.

Останнім часом все більше уваги приділяють використанню дедуктивного методу із застосуванням дерева відмов – стандартизованого методу, що широко застосовується в оцінюванні надійності.

Побудова дерева відмов лежить в основі логіко-ймовірнісної моделі причинно-наслідкових зв'язків відмов системи з відмовами її елементів та іншими подіями.

Дерево відмов, або дерево несправностей (Fault Tree) – це структурно-логічна схема, яка пов'язує головну подію (втрата надійності геодезичної мережі) з основними вхідними подіями (знищення геодезичних пунктів або їх зміщення, зміна їх планово-висотного положення внаслідок впливу різних факторів), які спричинили появу головної події. На рисунку 4 показано дерево несправностей ГМ.

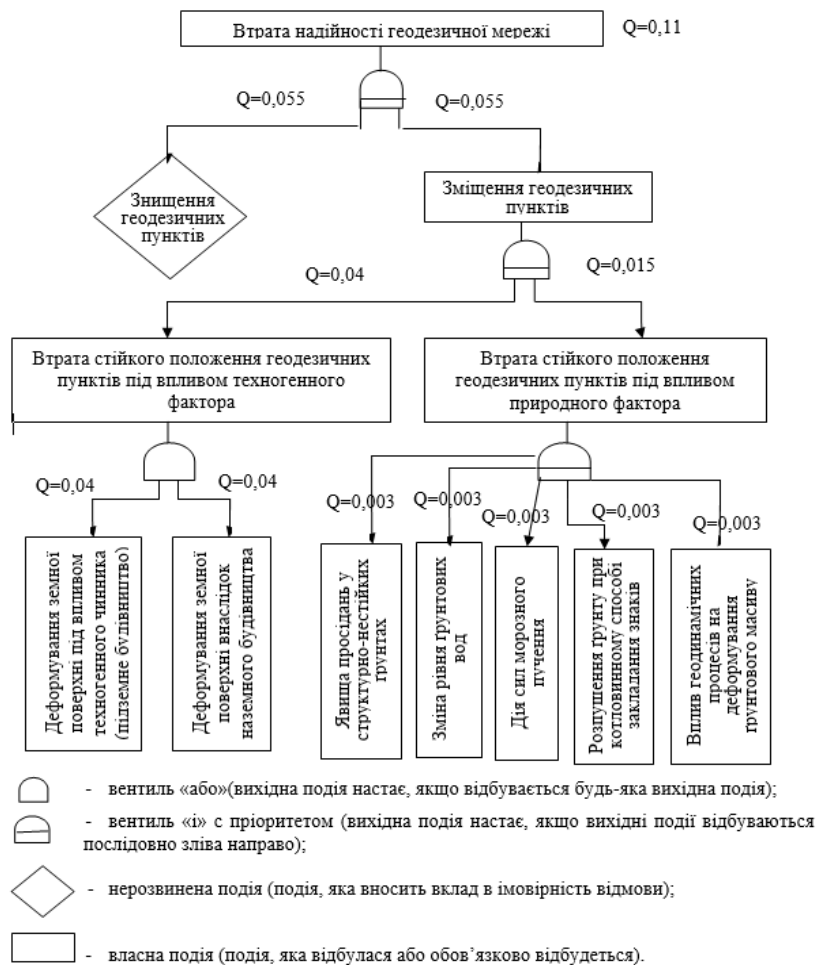


Рис. 4. Дерево несправностей геодезичної мережі

Втрата надійності ГМ настає, коли $P(t) < 0,9$, а отже $Q > 0,1$. Метод аналізу дерева сприяє ретельному аналізу причин відмов ГМ і вживанню заходів, найбільш ефективних для їх усунення. Такий аналіз проводять для кожного періоду функціонування, кожної частини або системи в цілому.

Відповідно до рисунка 4 ГМ втратить надійність за ймовірності виходу із ладу системи $Q = 0,11$, що, у свою чергу, відбудеться у разі виході із ладу її елементів: знищенні ($Q = 0,055$) або зміщенні геодезичних пунктів ($Q = 0,055$).

Причиною настання таких подій може бути вплив техногенного фактора (наземного або підземного будівництва), а також комплексний вплив природного фактора.

Розглянемо випадок, коли система (геодезична мережа) складається з n елементів (геодезичних пунктів). У теорії булевої алгебри є тільки два стани системи: надійний (працездатний) та ненадійний (непрацездатний або стан відмови). Якщо

позначити цифрами елементи системи від 1 до n і прийняти, що система не відновлюється, опис стану кожного з них можна зобразити у вигляді послідовного дерева відмов (рис. 5).

Як показує цей рисунок, на рівні 0 всі елементи надійні; на другому рівні відбулась відмова одного з n елементів, при цьому, за умови, що номер непрацездатного елемента невідомий, наведені всі можливі варіанти відмов.

На другому рівні відбулась відмова ще одного з елементів, отже кількість працездатних (надійних) елементів ще на одиницю менша. Загальна кількість рівнів відмови елементів системи – n , тобто на заключному рівні n система втрачає працездатність усіх її елементів, отже, надійність системи дорівнює 0.

Із послідовного дерева відмов можна дістати інформацію про черговість відмов елементів. Якщо елементи відмовили в послідовності 1, 2, n , то ця ситуація відповідає другому вузлу зліва на рівні 3 (рис. 5).

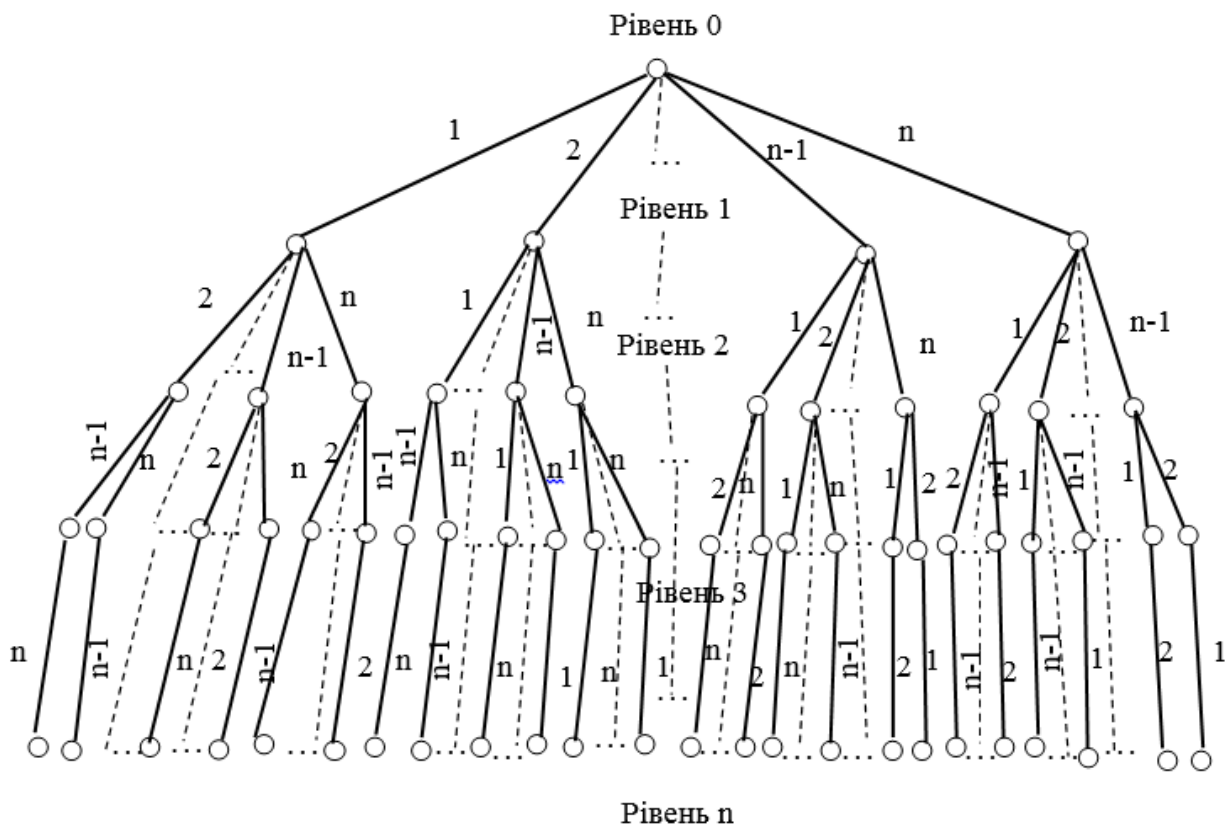


Рис. 5. Послідовне дерево відмов геодезичної мережі

У програмному засобі TopEvent FTA побудовано дерево відмов ГМ, що складалась із 5 пунктів (рис. 6), та ГМ, що включала 10 пунктів (рис. 7).

Для досягнення надійності мережі на рівні 90 % ($P(t) \geq 0,9$) у мережі, що включає 5 пунктів, недопустимий вихід із ладу хоч одного пункту.

Натомість у мережі, що включає 10 пунктів, при виході з ладу одного будь-якого елемента мережа залишається надійною. Проте вихід із ладу будь-яких двох елементів (рис. 7) спричинює втрату надійності мережі (ймовірність виходу з ладу мережі $Q \geq 0,11$).



Рис. 6. Дерево відмов ГМ, що включає 5 пунктів

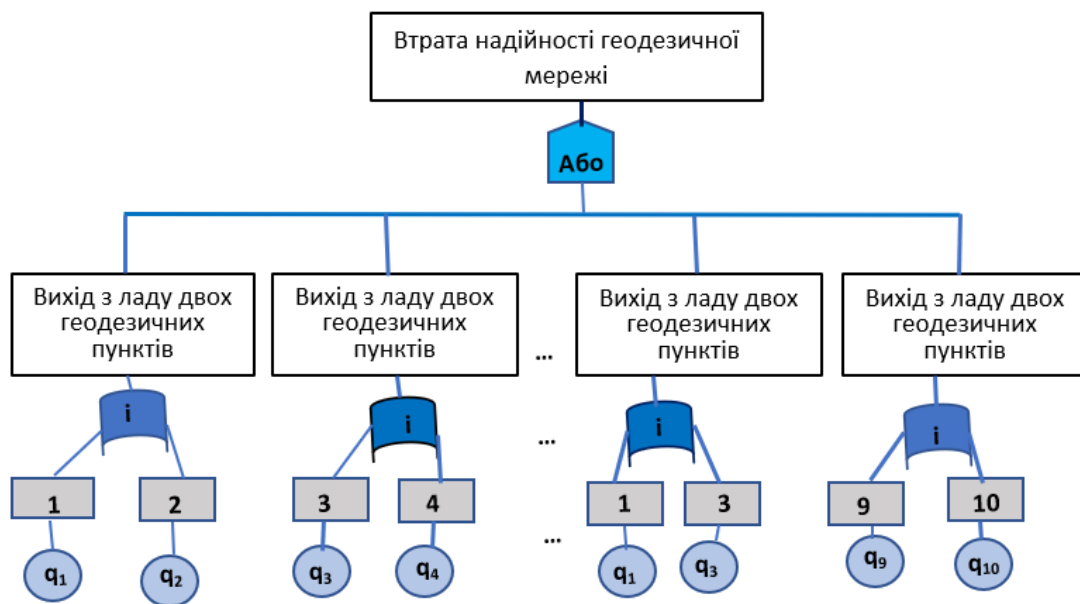


Рис. 7. Фрагмент дерева відмов ГМ, що включає 10 пунктів

Необхідно визначити багато чинників: загальну ймовірність небажаної події; комбінацію подій, які найбільш імовірно викличуть небажану подію; події, що найбільше сприяють цій комбінації, а також найбільш імовірні наслідки події чи шляхи до вершини дерева відмов. Основна перевага цього методу в тому, що ми можемо знайти слабкі місця нашої системи

(ГМ).

Щоб знайти усі комбінації елементів, що відмовлять і спричинять відмову всієї системи (ГМ) – функцію, яку отримують для верхньої події–рівень 0, потрібно мінімізувати. Набір диз'юнкцій – логічних додавань «або» (\vee) і кон'юнкцій – логічних мнужень «і» (\wedge) в результаті утворюють набір логічних норм, який буде визначати

«слабкі місця».

Дерево відмов дає можливість отримати ймовірність відмови системи і мінімальні перерізи–сукупність подій, які повинні одночасно відбутися, щоб система вийшла з ладу. Визначення слабких місць відбувається шляхом мінімізації складеної логічної функції.

Функція $f_1(a, b)$ – кон'юнкція (логічне множення) істинна тоді, коли a і b – істинні. Кон'юнкцію називають також функцією «і»; умовно її позначають:

$$f_1(a, b) = a \cdot b = a \wedge b.$$

Функція $f_2(a, b)$ – диз'юнкція (логічне додавання) істинна тоді, коли істинними є

$$Q = (q_1 \wedge q_2) \vee (q_1 \wedge q_3) \vee (q_1 \wedge q_4) \vee (q_1 \wedge q_5) \vee (q_1 \wedge q_6) \vee (q_1 \wedge q_7) \vee (q_1 \wedge q_8) \vee (q_1 \wedge q_9) \vee (q_1 \wedge q_{10}) \vee (q_2 \wedge q_3) \vee (q_2 \wedge q_4) \vee (q_2 \wedge q_5) \vee (q_2 \wedge q_6) \vee (q_2 \wedge q_7) \vee (q_2 \wedge q_8) \vee (q_2 \wedge q_9) \vee (q_2 \wedge q_{10}) \vee (q_3 \wedge q_4) \vee (q_3 \wedge q_5) \vee (q_3 \wedge q_6) \vee (q_3 \wedge q_7) \vee (q_3 \wedge q_8) \vee (q_3 \wedge q_9) \vee (q_3 \wedge q_{10}) \vee (q_4 \wedge q_5) \vee (q_4 \wedge q_6) \vee (q_4 \wedge q_7) \vee (q_4 \wedge q_8) \vee (q_4 \wedge q_9) \vee (q_4 \wedge q_{10}) \vee (q_5 \wedge q_6) \vee (q_5 \wedge q_7) \vee (q_5 \wedge q_8) \vee (q_5 \wedge q_9) \vee (q_5 \wedge q_{10}) \vee (q_6 \wedge q_7) \vee (q_6 \wedge q_8) \vee (q_6 \wedge q_9) \vee (q_6 \wedge q_{10}) \vee (q_7 \wedge q_8) \vee (q_7 \wedge q_9) \vee (q_7 \wedge q_{10}) \vee (q_8 \wedge q_9) \vee (q_8 \wedge q_{10}) \vee (q_9 \wedge q_{10}).$$

Ймовірність виникнення події відмови, що зображена на рисунку 7, буде у разі виходу із ладу будь-яких двох пунктів ГМ:

$$Q = 1 - (1 - q_1 \cdot q_2) \cdot (1 - q_1 \cdot q_3) \cdot (1 - q_1 \cdot q_4) \cdot (1 - q_1 \cdot q_5) \cdot (1 - q_1 \cdot q_6) \cdot (1 - q_1 \cdot q_7) \cdot (1 - q_1 \cdot q_8) \cdot (1 - q_1 \cdot q_9) \cdot (1 - q_1 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_2 \cdot q_3) \cdot (1 - q_2 \cdot q_4) \cdot (1 - q_2 \cdot q_5) \cdot (1 - q_2 \cdot q_6) \cdot (1 - q_2 \cdot q_7) \cdot (1 - q_2 \cdot q_8) \cdot (1 - q_2 \cdot q_9) \cdot (1 - q_2 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_3 \cdot q_4) \cdot (1 - q_3 \cdot q_5) \cdot (1 - q_3 \cdot q_6) \cdot (1 - q_3 \cdot q_7) \cdot (1 - q_3 \cdot q_8) \cdot (1 - q_3 \cdot q_9) \cdot (1 - q_3 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_4 \cdot q_5) \cdot (1 - q_4 \cdot q_6) \cdot (1 - q_4 \cdot q_7) \cdot (1 - q_4 \cdot q_8) \cdot (1 - q_4 \cdot q_9) \cdot (1 - q_4 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_5 \cdot q_6) \cdot (1 - q_5 \cdot q_7) \cdot (1 - q_5 \cdot q_8) \cdot (1 - q_5 \cdot q_9) \cdot (1 - q_5 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_6 \cdot q_7) \cdot (1 - q_6 \cdot q_8) \cdot (1 - q_6 \cdot q_9) \cdot (1 - q_6 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_7 \cdot q_8) \cdot (1 - q_7 \cdot q_9) \cdot (1 - q_7 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_8 \cdot q_9) \cdot (1 - q_8 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_9 \cdot q_{10}),$$

де $q_1, q_2 \dots q_{10}$ – логічні події, що спричинять вихід із ладу пунктів ГМ (внаслідок впливу природних або техногенних факторів).

У програмі TopEventFTA обчислюємо ймовірності відмови ГМ та її елементів, для цього обираємо метод обчислень (МТТА) і вводимо середній час до настання відмови кожного пункту (рис. 8).

Відповідно до рисунку 8, найбільша ймовірність виходу з ладу ГМ буде на

або a , або b , або обидві змінні. Диз'юнкцію часто називають також функцією «або» й умовно позначають так: $f_2(a, b) = a + b = a \vee b$.

Запишемо логічну функцію основної події (відмови системи) у випадку, коли лише 5 пунктів у мережі (рис. 6):

$$Q = q_1 \vee q_2 \vee q_3 \vee q_4 \vee q_5.$$

Ймовірність виникнення цієї події буде:

$$Q = 1 - (1 - q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5).$$

Запишемо логічну функцію та ймовірність основної події у випадку, коли вийдуть із ладу 8 пунктів ГМ із 10 пунктів (рис. 7):

основі виходу з ладу найменш стабільного геодезичного пункту 2.

Аналогічні структурні схеми (дерева відмов) з описом логічних функцій та ймовірностей виникнення основної події (відмова системи) можна записати для геодезичної мережі, що включає будь-яку кількість геодезичних пунктів.

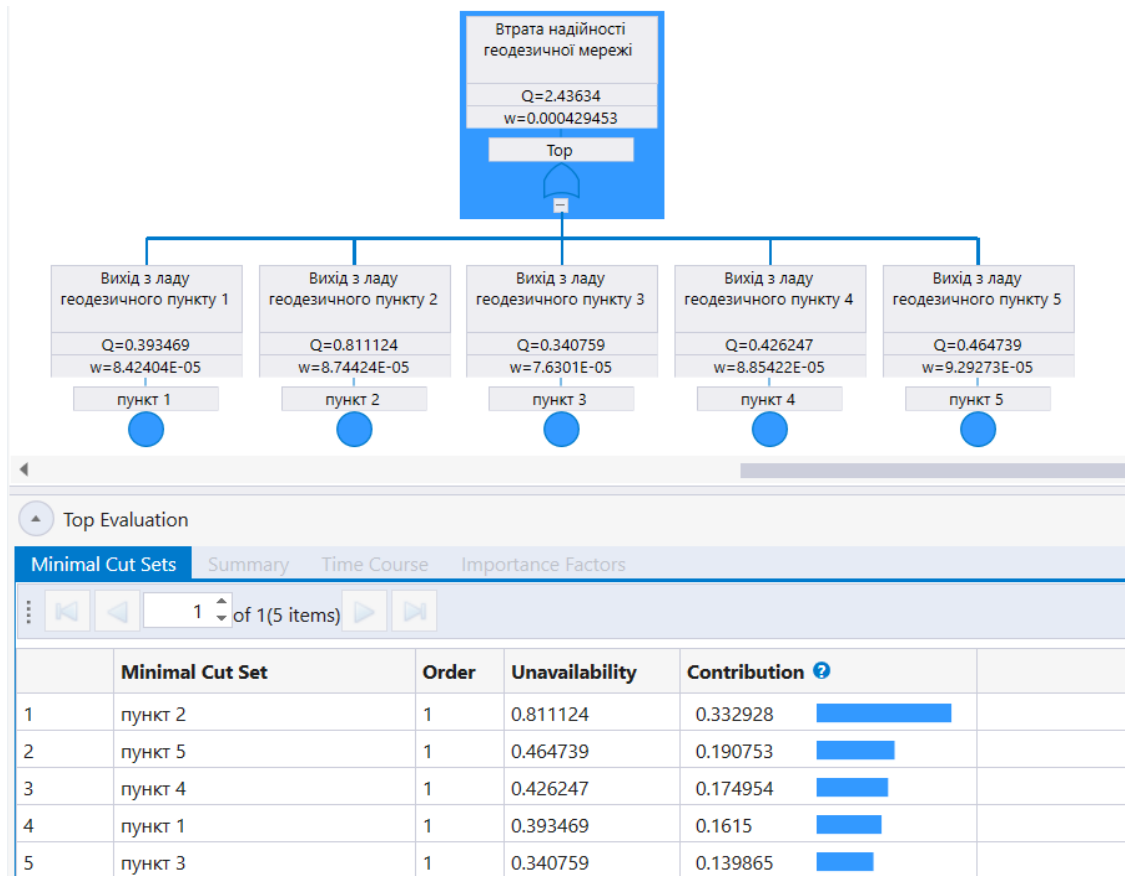


Рис. 8. Виявлення мінімальних перерізів побудованого дерева відмов

Висновки та перспективи розвитку напрямку

Дерево відмов – це логіко-ймовірнісна модель, структурно-логічна схема, яка відображає процедуру втрати працездатності (надійності) у вигляді логічних зв'язків між початковими (базовими) подіями. Базові події – це відмова елементів (геодезичних пунктів), а основна подія – це вихід із ладу геодезичної мережі.

Дерево відмов будується дедуктивним методом зверху вниз, на основі якого складається логічна функція непрацездатності. За допомогою методів алгебри логіки виконуємо її мінімізацію. Здійснюється перехід від логічних подій до ймовірностей. Важливе знаходження мінімальних перерізів – «слабких місць», які показують, вихід із ладу яких комбінацій геодезичних пунктів мережі спричинить втрату надійності ГМ. Сукупність таких слабких місць і буде фактичною ймовірністю відмови.

Для підсумку виконаних досліджень слід зазначити низку важливих моментів:

- надійність геодезичних пунктів впливає на достовірність результатів геодезичних і кадастрових робіт;
- застосування дедуктивного методу з побудовою структурно-логічної схеми у вигляді «дерева відмов» дозволяє виявити «слабкі місця» геодезичної мережі;
- застосування сучасних програмних засобів оцінки надійності (TopEventFTA, ALD Fault Tree Analyzer, FDiTA) дозволяє побудувати дерева відмов, обчислити ймовірність відмови системи та її елементів, виявити мінімальні перерізи на основі функцій алгебри логіки;
- для підвищення надійності можна ввести надлишковість елементів ГМ, своєчасно відновлювати геодезичні пункти за результатами моніторингу, тобто забезпечувати надійність (стабільність) певних елементів системи, а не замінювати більш надійними всі елементи одночасно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>
2. Порядок побудови Державної геодезичної мережі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#n9>
3. Порядок обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text>
4. Надійність. URL: <http://surl.li/pqzff>
5. Ішутіна Г. С. Оцінювання надійності геодезичної мережі при геомоніторингу забудованих територій : дис... к-та техн. наук : 05.24.01. Київ : Київський нац. ун-т будівн. та арх., 2015. 187 с.
6. Третяк К. Р., Савчин І. Р. Розроблення методики розрахунку надійності активних моніторингових геодезичних мереж. *Вісник геодезії та картографії*. 2013. № 1. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2013_1_5
7. Savchyn Ihor, Tretyak Korneliy. Research of reliability of active geodetic network for deformation monitoring of of hydro power plants (HPPs). *Conference: XXIII-d international symposium modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields*. № 23. Sofia, Bulgaria, 2013. URL: <http://surl.li/tsppd>
8. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25034
9. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53946
10. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99060
11. ДСТУ 2864-94. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77857
12. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51308
13. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93624
14. Gilad Even-Tzur. Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks. *Zeitschrift fur Geodasie, Geoinformation und Landmanagement, ZFV*. 2006. № 131 (2). Pp. 87–95 URL: <http://surl.li/tspqk>
15. Marcelo Tomio Matsuoka, Vinicius Francisco Rofatto, Ivandro Klein, Mauricio Roberto Veronez, Luiz Gonzaga da Silveira Jr., João Batista Silva Neto and Ana Cristina Ramos Alves. Control Points Selection Based on Maximum External Reliability for Designing Geodetic Networks. *Applied Sciences*, 2020. № 10 (2). URL: <http://surl.li/tsprc>
16. Waldemar Odziemczyk Comparison of selected reliability optimization methods in application to the second order design of geodetic network. *Journal of Applied Geodesy*, 2023. URL: <http://surl.li/tsprw>

REFERENCES

1. *Zakon Ukrainy "Pro topografo-heodezychnu i kartografigchnu diialnist"* [Law of Ukraine "On topographical, geodetic and cartographic activities"]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text> (in Ukrainian).
2. *Poriadok pobudovy Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [The procedure for building the State geodetic network]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#n9> (in Ukrainian).
3. *Poriadok obstezhennia ta onovlennia punktiv Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [The procedure for surveying and updating points of the State geodetic network]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text> (in Ukrainian).
4. *Nadiynist'* [Reliability]. URL: <http://surl.li/pqzff> (in Ukrainian).
5. Ishutina H.S. *Otsinyuvannya nadiynosti heodezychnoi merezhi pry heomonitorynhu zabudovanykh terytoriy : dys... kand. tekhn. nauk : 05.24.01* [Evaluation of the geodetic network reliability at geomonitoring of built-up territories : diss... Cand. Sc. (Tech.) : 05.24.01]. Kyiv, 2015, 187 p. (in Ukrainian).
6. Tretyak K.R. and Savchyn I.R. *Rozroblennia metodyky rozrakhunku nadiynosti aktyvnykh monitorynhovykh heodezychnykh merezh* [Development of a methodology for calculating the reliability of active monitoring geodetic networks]. *Visnyk heodezii ta kartografii* [Herald of Geodesy and Cartography] 2013, no. 1, pp. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2013_1_5 (in Ukrainian).
7. Savchyn Ihor and Tretyak Korneliy. Research of reliability of active geodetic network for deformation monitoring of of hydro power plants (HPPs). *Conference: XXIII-d international symposium modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields*. 2013, no. 23, Sofia, Bulgaria. URL: <http://surl.li/tsppd>
8. *DSTU 2860-94 Nadiynist tekhniky. Terminy ta vyznachennia* [Reliability of equipment. Terms and definitions]. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25034 (in Ukrainian).

9. DSTU 2862-94 *Nadiinist tekhniky. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti. Zahalni vymohy* [Reliability of equipment. Methods of calculating reliability indicators. general requirements]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53946 (in Ukrainian).

10. DSTU 2863-94. *Nadiinist tekhniky. Prohrama zabezpechennia nadiinosti. Zahalni vymohy* [Reliability of equipment. Reliability program. General requirements]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99060 (in Ukrainian).

11. DSTU 2864-94. *Nadiinist tekhniky. Eksperymentalne otsiniuvannia ta kontrol nadiinosti. Osnovni polozhennia.* [Reliability of equipment. Experimental assessment and reliability control. Substantive provisions]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77857 (in Ukrainian).

12. DSTU 3004-95. *Nadiinist tekhniky. Metody otsinky pokaznykiv nadiinosti za eksperymentalnymy danymy* [Reliability of equipment. Methods of estimating reliability indicators based on experimental data]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51308 (in Ukrainian).

13. DSTU 3433-96. *Nadiinist tekhniky. Modeli vidmov. Osnovni polozhennia* [Reliability of equipment. Failure models. Substantive provisions]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93624 (in Ukrainian).

14. Gilad Even-Tzur. Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks. *Zeitschrift fur Geodasie, Geoinformation und Landmanagement, ZFV*. 2006, no. 131 (2), pp. 87–95. URL: <http://surl.li/tspqk>

15. Marcelo Tomio Matsuoka, Vinicius Francisco Rofatto, Ivandro Klein, Mauricio Roberto Veronez, Luiz Gonzaga da Silveira Jr., João Batista Silva Neto and Ana Cristina Ramos Alves. Control Points Selection Based on Maximum External Reliability for Designing Geodetic Networks. *Applied Sciences*. 2020, no. 10 (2). URL: <http://surl.li/tsprc>

16. Waldemar Odziemczyk. Comparison of selected reliability optimization methods in application to the second order design of geodetic network. *Journal of Applied Geodesy*. 2023. URL: <http://surl.li/tsprw>

Надійшла до редакції: 13.04.2024.