

DOI: 10.32347/2076-815x.2025.90.452-462

УДК 528.3:620.9

к.т.н., доцент Ішутіна Г.С.,

ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0665-3040,

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ

Зроблений ретроспективний аналіз досліджень оцінки надійності геодезичних мереж (ГМ). Розглянуто 4 історичні етапи досліджень оцінки надійності ГМ та виділені основні методи оцінки та моделювання надійності. Проблема оцінки та забезпечення надійності є актуальною в наш час і вимагає проведення комплексу досліджень та розрахунків, які дозволять використовуючи певну науково-обґрунтовану методику оцінки надійності змодельовати функціонування ГМ у реальних умовах з урахуванням впливу різних факторів та виявити доцільну періодичність обстеження пунктів ГМ для відновлення її стану та подальшого безвідмовного функціонування. Встановлено, що надійність ГМ закладається в процесі її проєктування завдяки правильному вибору розташування її елементів (геодезичних пунктів) та вибором конструкції пунктів (знаків). Надійність зберігається шляхом правильного зберігання (охорони) геодезичних пунктів і підтримується під час її експлуатації внаслідок періодичних обстежень геодезичних пунктів та їх відновленням у разі необхідності. Наразі шляхом застосування робастних методів та комп'ютерного моделювання методом Монте-Карло можна оцінити запроєктовану ГМ та виконати її оптимізацію для забезпечення заданого рівня надійності через виявлення «слабких місць» внаслідок поганої конфігурації, що стає причиною появи похибок (збоїв). З використанням методу «простору станів» можна виявити час перебування ГМ у різних станах залежно від зміни інтенсивності відмов та відновлення геодезичних пунктів, тобто змодельовати поведінку технічної системи (геодезичної мережі) на стадії її проєктування.

Ключові слова: оцінка надійності; геодезичні мережі; дерево відмов; марківські процеси; булеві функції; робастні методи; метод Монте-Карло.

Постановка проблеми. Першим, хто розробив систематичну основу статистичного контролю якості в геодезії був професор Willem Baarda (1917 - 2005) – відомий вчений геодезист, який працював у галузі теорії помилок та процедур коригування, заснованих на статистичних методах. Його винахід S-перетворень сьогодні використовується для коригувань «вільної мережі».

Впровадження критеріальних матриць для перевірки точності мережі також належить йому, як і винахід концепції надійності, яка зараз широко використовується.

З появою нового терміну «надійності геодезичних мереж» у центрі уваги як закордонних, так і вітчизняних науковців постало питання вибору оптимального методу оцінки надійності геодезичних мереж (ГМ), про що свідчить значна кількість публікацій за цією тематикою [1-10].

Наразі можна виділити наступні основні методи оцінки та моделювання надійності:

- метод попередньої оцінки надійності, який використовують для оцінки надійності технічних систем на етапі їх проектування;
- метод імітаційного моделювання (Монте Карло), що дозволяє побудувати математичну модель функціонування геодезичної мережі з невизначеними значеннями параметрів виходу з ладу (зміщення або знищення) пунктів для різних ймовірнісних процесів;
- метод «простору станів» з побудовою у вигляді графа станів і переходів надійнісної моделі ГМ;
- логіко-ймовірнісний метод моделювання відмов ГМ з побудовою «дерева відмов»;
- метод побудови дискретно-неперервних стохастичних марківських надійнісних моделей функціонування МГМ з повним та поточним відновленням.
- метод структурних схем надійності – використовують для систем, що мають окремі модулі, складові частини;
- інші методи.

Кожен з наведених методів має свої недоліки, переваги та особливості застосування лише для певної технічної системи, ось чому для достовірної, якісної оцінки надійності геодезичних мереж важливо підібрати оптимальний метод, що найбільш повно і достовірно надає інформацію про стан функціонування ГМ, виявить максимальний час роботи до відмови, дає можливість оцінити результати вхідних і вихідних параметрів і в результаті зрозуміти з якою періодичністю краще відновити мережу, підтримувати її у працездатному стані весь час її використання. Отже, застосування методів оцінки надійності допоможе у майбутньому приймати виважені, грамотні управлінські рішення щодо використання геодезичних мереж, їх схоронності та працездатності.

Надійність є найважливішою характеристикою якості будь-якої технічної системи в тому числі геодезичної мережі (ГМ), що характеризує її властивість безвідмовної роботи протягом заданого проміжку часу в заданих умовах

експлуатації. Проблема оцінки та забезпечення надійності є актуальною в наш час і вимагає проведення комплексу досліджень та розрахунків, які дозволять використовуючи певну науково-обґрунтовану методику оцінки надійності змодельовати функціонування ГМ у реальних умовах з урахуванням впливу різних факторів та виявити доцільну періодичність обстеження пунктів ГМ для відновлення її стану та подальшого безвідмовного функціонування.

Надійність ГМ закладається в процесі її проєктування, створення (закладання) шляхом правильного вибору розташування її елементів (геодезичних пунктів) та конструкції пунктів (знаків). Надійність зберігається шляхом правильного зберігання (охорони) геодезичних пунктів і підтримується під час її експлуатації внаслідок періодичних обстежень геодезичних пунктів та їх відновленням у разі необхідності. Отже, надійність ГМ як технічної системи визначається надійністю її елементів (геодезичних пунктів), тому знання основних питань нормування показників надійності є необхідною умовою для успішної роботи у галузі геодезії.

Дослідив основні праці з оцінки надійності геодезичних мереж, наразі можна виділити декілька етапів досліджень:

1) Початковий етап (XVIII — початок XX ст.)

На цьому етапі головну увагу приділяли точності вимірювань і конструкції мереж, переважно тріангуляційних. Надійність у сучасному розумінні ще не розглядалася як окрема наукова категорія. Вагомий науковий внесок у дослідженнях був зроблений К. Ф. Гауссом, Ф. В. Бесселем, Ф. Гельмертом – вони заклали основи математичного вирівнювання мереж. Основними методами побудови геодезичних мереж великого охоплення був метод класичної тріангуляції, а вирівнювання здійснювалось за методом найменших квадратів (МНК).

2) Формування поняття надійності (1950–1970-ті рр.)

У післявоєнний період із розвитком обчислювальної техніки почали активно аналізувати структурні та функціональні властивості мереж, зокрема – чутливість до помилок і виявлення грубих похибок. У цей період нідерландським вченим Willem Baarda у 1967 р. було введено поняття внутрішньої надійності геодезичних мереж (здатність мережі виявляти грубі помилки у спостереженнях) та зовнішньої надійності (вплив на координати точок ненайдених помилок).

У 1968 р. W. Baarda запропонував теорію мінімально помітної похибки (Data Snooping), критерії w-test, t-test. У цей час активно починають застосовувати статистичні методи оцінки якості геодезичних мереж.

3) Перехід до оптимізації і стійкості (1980–1990-ті рр.)

У цей період надійність почали розглядати в контексті оптимізації конфігурації мережі, вибору базових вимірювань та числової стійкості, вивчаються алгоритми зміни конфігурації мереж, що забезпечують максимальну надійність при мінімальних затратах. Відбувається розвиток понять структурної стійкості, надлишковості, матриці чутливості. Запропоновані геометричні критерії надійності (наприклад, фактор геометричної конфігурації). Також в цей період підвищився інтерес до застосування спектральних методів, графових моделей.

4) Сучасний етап (2000-ті – дотепер)

На цьому етапі надійність аналізується у поєднанні з ГНСС-технологіями, інтегрованими системами позиціонування, мережами постійно діючих станцій (CORS).

Основними напрямками досліджень на цьому етапі є:

- застосування векторного спостереження (GNSS), нових методів вирівнювання;
- розширення надійності на динамічні мережі (моніторинг деформацій, інженерні споруди);
- розробка автоматизованих систем контролю та алгоритмів реального часу;
- залучення штучного інтелекту для виявлення аномалій у великих геопросторових даних;
- вивчаються нестационарні процеси, адаптивні методи оцінки надійності.

Мета публікації. Виконати огляд та аналіз публікацій з оцінки надійності геодезичних мереж. Детальне дослідження даних з минулого за певний період дозволить виявити закономірності, причини успіхів та невдач, а також оцінити зміни у кількісному та якісному відношенні. Виявити недоліки та переваги існуючих методів оцінки надійності, обґрунтувати найбільш доцільну методику оцінки надійності для локальних геодезичних мереж з урахуванням впливу різних чинників.

Основна частина. Протягом 50 років свого існування концепція надійності W. Baarda використовувалася як стандартна практика для контролю якості в геодезії. Авторами у публікації [1] були проаналізовані новаторські роботи W. Baarda 1967 та 1968 р., а також останні дослідження з надійності ГМ. Автори надали огляд останніх досягнень у теорії надійності геодезії, з особливим акцентом на метод Монте-Карло і прийшли до висновку, що поява персональних комп'ютерів з потужними процесорами зробила метод Монте-Карло (ММК) привабливим та економічно ефективним підходом для цілей контролю якості.

У роботі [2] автори представили результати комп'ютерного моделювання методом Монте-Карло із використанням методів робастної оцінки, показали,

що ММК є практичним методом оцінки рівнів ймовірності, пов'язаних із процедурою статистичного тестування. Цей метод не використовує вектор спостережень, повторно виявлених у польових умовах, залежить лише від геометричної конфігурації мережі (функціональна модель), від невизначеностей спостережень (стохастична модель) та від величини викиду (похибок).

ММК (метод Монте-Карло) на думку авторів [2] є найкращою лінійно-нечастковою оцінкою, а також розв'язком максимальної правдоподібності, коли випадкові помилки відповідають нормальному розподілу. При цьому властивості розв'язку, отриманого за ММК, не гарантовані, коли не спостерігаються викиди. Якщо викиди не будуть ідентифіковані раніше, вони потенційно впливатимуть на оцінку кожного параметра.

Автори прийшли до висновку, що слід враховувати сценарії з наявністю кількох викидів та розглянути проблематику ітеративного виявлення відстежених даних, яке не працює. Якість оцінок параметрів за допомогою класичного методу найменших квадратів залежить від помилок. Для обробки спостережень, що містять похибки, часто використовуються два методи: методи робастної оцінки та процедури, засновані на статистичних тестах (роботи Baarda; Pope; Lehmann and Lösler; Klein та ін.). Робастні методи (або методи з робастністю) – це сукупність підходів, які забезпечують стійкість системи до збурень, похибок та невизначеностей у даних або моделі.

У роботі [3] авторами виконано моделювання методом Монте-Карло для дослідження ефективності ітеративної процедури відстеження даних W. Baarda як тестової статистики для ідентифікації викидів у моделі Гауса-Маркова. На думку авторів ітеративна процедура відстеження даних може ідентифікувати більше спостережень, ніж реальна кількість змодельованих викидів. Доступна ймовірність надмірної ідентифікації дозволяє підвищити ймовірність помилки III типу, а також, ймовірно, ідентифікацію викидів. Процедура відстеження даних була більш реалістичною, коли в симуляції розглядався випадок надмірної ідентифікації. Автори у публікації [3] дійшли висновку, що для мережі GNSS ітеративна процедура відстеження даних на основі Монте-Карло може знайти викид порядку величини $4,5\sigma$ з високим рівнем успіху.

У роботі [4] були виявлені шляхом перехресної перевірки спостережень для існуючих геодезичних мереж або на етапі їх проєктування «слабкі місця» внаслідок поганої конфігурації, що стало причиною появи похибок (збоїв).

Автори ввели медіанні рівняння, отримані з рівнянь умов, серед спостережень, враховуючи певну кількість викидів, які необхідно виявити в мережі заздалегідь. Спочатку запропонований метод був застосований до мережі нівелювання. Потім, щоб застосувати новий метод до всіх видів геодезичних мереж, було розроблено загальний алгоритм. Використовуючи цей

підхід, можна знайти контрольовані або неконтрольовані спостереження з метою виявлення викидів в існуючій мережі. На етапі проєктування геодезичних мереж можна вирішити, чи надійно запроєктована мережа, до початку польових робіт. Якщо конфігурація мережі виявляється слабкою в якійсь частині, її можна покращити, додавши необхідні спостереження до плану геодезичних робіт.

Правильне та оптимальне проєктування та подальша оцінка геодезичних мереж є невід'ємною частиною більшості інженерно-геодезичних проєктів. Оптимізація та проєктування виконуються до фактичного проведення вимірювань. Геодезична мережа проєктується та оптимізується з точки зору високої надійності, а результати порівнюються з результатами, отриманими методом аналізу робастності. Метою оптимального проєктування є вирішення як питань конфігурації мережі («проєктування першого порядку»), так і точності спостережень («проєктування другого порядку»), щоб відповідати бажаним критеріям. Для цієї мети у роботі [5] застосовано аналітичний метод для виконання проєктування першого порядку, проєктування другого порядку та/або комбінованого проєктування. Авторами публікації [5] для оцінки геометричної міцності геодезичної мережі результати аналізу робастності відобразили з точки зору робастності при обертанні, робастності при зсуві та робастності при масштабуванні. Результати показали, що на параметри робастності впливають числа надмірності. Найбільші параметри робастності були отримані завдяки спостереженням з мінімальними числами надлишковості.

Робастний аналіз використовує зовнішній критерій надійності W. Baarda як локальне поле зміщення. Градієнти локального поля зміщення оцінюються окремо для кожної з координат x та y . Окреме локальне поле зміщення визначається для кожного компонента координати, і градієнти вздовж кожної з осей координат оцінюються для отримання компонентів матриці деформації. Традиційно критерій внутрішньої надійності використовується як міра для оптимального проєктування геодезичних мереж для високої надійності.

У публікації [5] виконана оцінка критеріїв надійності та застосований робастний аналіз лише для трилатераційної мережі, що складалась з 17 точок із 66 спостереженнями відстані. Отримані результати були перевірені автором на кількох змодельованих та реальних геодезичних мережах. Приблизна точність спостережень відстані становить 5 мм, і передбачається, що дата мережі забезпечується внутрішніми обмеженнями.

Отримані у публікації [5] результати показують, що периметр геодезичної мережі відносно слабший, ніж середина, оскільки найбільші параметри робустності зазвичай розташовані на краях мережі. Це пояснюється тим, що ці

станції пов'язані з рештою мережі за кількістю спостережень, які є меншими та/або слабшими. Щоб вирішити цю проблему, рекомендується, якщо можливо, спостерігати за зовнішніми точками мережі (від одного боку до іншого). При цьому на параметри робастності впливає надлишковість, тобто ці показники корелюються між собою.

Таким чином, покращення мінімального числа надлишковості допомагає зменшити максимальні параметри робастності (щоб підвищити робастність мережі). Можна зробити висновок, що критерії надійності та аналіз робастності використовуються для оцінки міцності мережі: один у спостереженнях мережі, а інший у конфігурації мережі. Ці два показники сильно корелюють один з одним. Як кінцевий результат, автори у публікації [5] стверджують, що можна спроектувати геодезичну мережу з високою надійністю аналітичним методом та перевірити її за допомогою аналізу робастності, щоб отримати мережу з високою міцністю.

Сучасна теорія надійності базується на припущенні про один вид викидів (похибок), що не відповідає дійсності. Публікація [6] розширює теорію надійності таким чином, щоб її можна було застосовувати до кількох викидів шляхом виведення відповідних мір надійності для їх врахування. Авторами були розглянуті міри надійності, що включають виявлені мінімальні зміщення, показники надійності, керованість та зовнішню надійність.

Бегічев С. В. та Ішутіна Г. С. розпочали досліджувати надійність геодезичних мереж з 2010 р. У дисертаційній роботі [7] обґрунтований вибір оптимального методу оцінки надійності опорних геодезичних пунктів та виконано прогнозування надійності опорних пунктів геодезичної мережі та вибір періодичності контролю їх координат.

У роботі [8] із використанням програмного продукту Top Event FTA застосований метод побудови логіко-ймовірнісної моделі у вигляді «дерева відмов» – структурно-логічної схеми поступового виходу з ладу (зміщення або знищення) пунктів геодезичної мережі. За допомогою булевих функцій описані математичні вирази функцій відмови геодезичної мережі, виконана оцінка її надійності, обчислена інтенсивність відмов на різних етапах функціонування ГМ.

Метод «простору станів», що був використаний у публікації [9], дозволив виявити час перебування у різних станах геодезичної мережі залежно від зміни інтенсивності відмов та відновлення геодезичних пунктів, тобто змодельовати поведінку технічної системи (геодезичної мережі) на стадії її проектування. Для геодезичної мережі, що складалась з 8 пунктів, було побудовано граф станів та переходів, а також складено систему лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, розв'язав яку було знайдено середній час роботи

системи між відмовами. У висновку було запропоновано не доводити ГМ до непрацездатного стану, а відновлювати ГМ за результатами планових обстежень, які мають бути проведені з розрахованою періодичністю.

У публікації [10] обґрунтований вибір дискретно-неперервної стохастичної моделі функціонування маркшейдерсько-геодезичної мережі на основі застосування метода «простору станів», що найбільш повно описує процес функціонування (поведінки) динамічної системи. Встановлені залежності між показниками надійності та показниками безпечності. Також було рекомендовано застосовувати модель маркшейдерсько-геодезичної мережі із поточним відновленням мережі, що дозволяє підтримувати заданий рівень надійності шляхом своєчасного технічного обслуговування (відновлення).

Висновки. Дослідження проблеми надійності геодезичних мереж еволюціонували від емпіричного підходу до строгої математичної бази з урахуванням новітніх технологій. Сьогодні надійність розглядається як комплексна характеристика, що включає точність, стійкість, здатність до виявлення та нейтралізації помилок, і є критично важливою у високоточній геодезії, навігації та моніторингових системах. Протягом XVIII-XXI ст. простежується еволюція методів оцінки надійності геодезичних мереж, починаючи від основ математичного вирівнювання мереж і закінчуючи появою нових методів оцінки надійності та програмних засобів для їх реалізації.

Враховуючи той факт, що геодезичні мережі забезпечують єдину систему координат для всієї території країни, що є основою для всіх інженерних, наукових та господарських завдань, їх використовують для створення топографічних карт, виконання інженерно-геодезичних робіт у будівництві, ведення земельних кадастрів та топографічного знімання земельних ділянок, тощо, питання оцінки надійності геодезичних мереж є актуальним в наш час і потребує подальших досліджень. Пропонується у майбутніх дослідженнях врахувати комплексний вплив різних чинників на стабільність геодезичних пунктів та розрахувати (оцінити) надійність геодезичної мережі, спрогнозувати функціонування ГМ (перебування у працездатному стані) шляхом введення у розрахунки певних коефіцієнтів впливу як техногенних так і природних факторів для формування положень у нормативну документацію з проєктування, реконструкції та розвитку геодезичних мереж.

Список використаної літератури

1. Rofatto V.F., Matsuoka M.T., Klein I., Veronez M.R., Bonimani M.L., Lehmann R. A half-century of Baarda's concept of reliability: a review, new perspectives, and applications. *Survey Review*, 2018. 52(1). p. 261-277. URL: https://www.researchgate.net/publication/329102218_A_half-century_of_Baarda's_concept_of_reliability_a_review_new_perspectives_and_applications

2. Rofatto V.F., Matsuoka M.T., Klein I. Método Monte Carlo aplicado à análise de confiabilidade em geodésia. URL: https://www.researchgate.net/publication/321018716_METODO_MONTE_CARLO_APLICADO_A_ANALISE_DE_CONFIABILIDADE_EM_GEODESIA#fullTextFileContent
3. Rofatto V.F., Matsuoka M.T., Klein I. An Attempt to Analyse Baarda's Iterative Data Snooping Procedure based on Monte Carlo Simulation. South African Journal of Geomatics, Vol. 6. No. 3, October 2017. P. 416-435. URL: https://www.researchgate.net/publication/320820618_An_Attempt_to_Analyse_Baarda's_Iterative_Data_Snooping_Procedure_based_on_Monte_Carlo_Simulation#fullTextFileContent.
4. Hekimoglu S., Erenoglu R. C., Sanli D. U., Erdogan B. Detecting Configuration Weaknesses in Geodetic Networks. Survey Review. Volume 43, 2011. p. 713-730 URL: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1179/003962611X13117748892632?needAccess=true>
5. Simkooei A.A. Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks. Journal of Geodesy. 2001. no75: p. 227-233. URL: https://www.researchgate.net/publication/225344876_Comparison_of_reliability_and_geometrical_strength_criteria_in_geodetic_networks
6. Knight, N.L.; Wang, J.; Rizos, C. Generalised measures of reliability for multiple outliers. Journal of Geodesy, v. 84, n. 10, p. 625–635, 2010. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-010-0392-4>
7. Ішутіна Г.С. Оцінювання надійності геодезичної мережі при геомоніторингу забудованих територій : дис. ... канд. техн. наук : 05.24.01. Київ, 2015. 187 с.
8. Бегічев С.В., Ішутіна Г.С., Трегуб О.В. Логіко-ймовірнісне моделювання відмов геодезичних мереж. Український журнал будівництва та архітектури, № 3 (021), 2024. С. 33-47.
9. Бегічев С.В., Ішутіна Г.С., Чумак Л.О. Дослідження надійності геодезичної мережі для забезпечення геодезичного супроводу будівництва. Український журнал будівництва та архітектури, № 5 (023), 2024. С. 7-20.
10. Biechichev S.V., Ishutina H.S., Chumak L.A., Hoichuk A.P. Assessing the reliability of a surveying and geodetic network based on a Markov model. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2024, № 6. P.p. 21-27. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/021>

Ph.D., associate professor, **Hanna Ishutina**,
Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF RESEARCH ON THE PROBLEM OF RELIABILITY OF GEODETIC NETWORKS

A retrospective analysis of research on the reliability assessment of geodetic networks (GN) has been conducted. Four historical stages of GN reliability assessment studies are considered, and the main methods of reliability evaluation and modeling are identified. The issue of assessing and ensuring reliability remains relevant today and requires a comprehensive set of studies and calculations. These would allow the modeling of GN operation under real-world conditions using scientifically grounded reliability assessment methodologies, taking into account various influencing factors. Such modeling would also help determine the optimal frequency for inspecting GN points to restore their condition and ensure

uninterrupted future operation. It has been established that GN reliability is initially determined during the design phase through the proper selection of point locations (geodetic stations) and the choice of point construction (marks). Reliability is preserved through the appropriate maintenance and protection of geodetic points and is supported during operation via regular inspections and restoration when necessary. Currently, the application of robust methods and computer-based Monte Carlo simulations allows for the evaluation of the designed GN and its optimization to ensure a specified level of reliability. This is achieved by identifying "weak spots" resulting from poor configuration, which often lead to errors or failures. Additionally, the use of the "state space" method enables the identification of the time GN remains in various states depending on changes in failure and recovery rates of geodetic points —thus allowing for the modeling of the technical system's (geodetic network's) behavior at the design stage.

Keywords: reliability assessment; geodetic networks; fault tree; Markov processes; Boolean functions; robust methods; Monte Carlo method.

REFERENCES

1. Rofatto V.F., Matsuoka M.T., Klein I., Veronez M.R., Bonimani M.L., Lehmann R. A half-century of Baarda's concept of reliability: a review, new perspectives, and applications. *Survey Review*, 2018. 52(1). p. 261-277. URL: https://www.researchgate.net/publication/329102218_A_half-century_of_Baarda's_concept_of_reliability_a_review_new_perspectives_and_applications. {in English}.
2. Rofatto V.F., Matsuoka M.T., Klein I. Método Monte Carlo aplicado à análise de confiabilidade em geodésia. URL: https://www.researchgate.net/publication/321018716_METODO_MONTE_CARLO_APLICADO_A_ANALISE_DE_CONFIABILIDADE_EM_GEODESIA#fullTextFileContent. {in English}.
3. Rofatto V.F., Matsuoka M.T., Klein I. An Attempt to Analyse Baarda's Iterative Data Snooping Procedure based on Monte Carlo Simulation. *South African Journal of Geomatics*, Vol. 6. No. 3, October 2017. P. 416-435. URL: https://www.researchgate.net/publication/320820618_An_Attempt_to_Analyse_Baarda's_Iterative_Data_Snooping_Procedure_based_on_Monte_Carlo_Simulation#fullTextFileContent. {in English}.
4. Hekimoglu S., Erenoglu R. C., Sanli D. U., Erdogan B. Detecting Configuration Weaknesses in Geodetic Networks. *Survey Review*. Volume 43, 2011. p. 713-730. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1179/003962611X13117748892632?needAccess=true>. {in English}.

5. Simkooei A.A. Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks. *Journal of Geodesy*. 2001. no75: p. 227-233. URL: https://www.researchgate.net/publication/225344876_Comparison_of_reliability_and_geometrical_strength_criteria_in_geodetic_networks. {in English}.
6. Knight, N.L.; Wang, J.; Rizos, C. Generalised measures of reliability for multiple outliers. *Journal of Geodesy*, v. 84, n. 10, p. 625–635, 2010. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-010-0392-4>. {in English}.
7. Ishutina H.S. (2015) Assessment of the reliability of the geodetic network in geomonitoring of built-up areas: diss... Cand. Sc. (Tech.): 05.24.01 [Otsiniuvannia nadiinosti heodezychnoi merezhi pry heomonitorynhu zabudovanykh terytorii]: dys... kand. tekhn. nauk: 05.24.01]. Kyiv, 2015, 187 p. {in Ukrainian}
8. Biehichev S.V., Ishutina H.S., Tregub O.V. (2024) Logical-probabilic modeling of failures of geodesic networks [Lohiko-ymovirnisne modeliuвання vidmov heodezychnykh merezh] *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, no. 3(021), pp. 33–46. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/309164> {in Ukrainian}
9. Biehichev S.V., Ishutina H.S., Chumak L.A. (2024) Research of the reliability of the geodetic network in providing geodetic support of construction [Doslidzhennia nadiinosti heodezychnoi merezhi dlia zabezpechennia heodezychnoho suprovodu budivnytstva]. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, no. 5 (023), pp. 7–20. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/315607/306317> {in Ukrainian}
10. Biehichev S.V., Ishutina H.S., Chumak L.A., Hoichuk A.P. Assessing the reliability of a surveying and geodetic network based on a Markov model. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024, № 6. P.p. 21-27. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/021>. {in English}.