

УДК 528.04:519.237

DOI: 10.30838/UJCEA.2313.290426.7.1221

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ м. ДНІПРО ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЧИСЕЛЬНОГО ІМІТАЦІЙНОГО СТАТИСТИЧНОГО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

БЕГІЧЕВ С. В.¹, канд. техн. наук, доц.,
ШУТИНА Г. С.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
ЧУМАК Л. О.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 965-93-71, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 518-42-54, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Кафедра фізики та прикладної математики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 328-19-35, e-mail: larisa4umak@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

Анотація. Геодезична мережа є фундаментальною основою для виконання топографо-геодезичних робіт, забезпечення будівництва, інженерних вишукувань, картографування та ведення земельного кадастру. Надійна, точна та стабільна мережа забезпечує достовірність і безпеку геопросторових даних. У містах з інтенсивною господарською діяльністю, таких як м. Дніпро, геодезичні пункти зазнають значного впливу, що може призводити до їх зміщення, втрати стабільності та зниження надійності геодезичної мережі (ГМ). Традиційні методи оцінки стану мережі базуються на періодичних вимірюваннях положень пунктів і аналізі їх зміщень, що є трудомістким та часовитратним процесом. Застосування методу Монте-Карло дозволяє моделювати численні сценарії можливих зміщень геодезичних пунктів і оцінювати надійність мережі з високою точністю, враховуючи як випадкові, так і систематичні похибки вимірювань. Це значно скорочує час та зусилля на обробку даних, дає змогу прогнозувати потенційні проблеми мережі та планувати пріоритетні заходи для її підтримки та оновлення. **Мета роботи** – оцінити надійність ГМ м. Дніпро з використанням методу Монте-Карло для моделювання

можливих зміщень геодезичних пунктів. Виконати аналіз нормативно-правових документів із обстеження геодезичних мереж, закордонних та вітчизняних літературних джерел із застосування методу Монте-Карло в геодезії. **Методика.** Використання методу Монте-Карло для моделювання численних сценаріїв

можливих зміщень геодезичних пунктів. Врахування випадкових та систематичних похибок вимірювань для більш реалістичної оцінки надійності мережі. Порівняння результатів чисельного моделювання з даними періодичних вимірювань традиційними методами для верифікації та оцінки ефективності підходу. Аналіз результатів для прогнозування потенційних деформацій та планування заходів щодо підтримки та оновлення мережі.

Наукова

новизна. Вперше застосовано метод Монте-Карло для комплексного моделювання можливих зміщень

геодезичних пунктів у міських умовах з високим навантаженням. Визначено вплив випадкових і систематичних похибок вимірювань на надійність геодезичної мережі. Проведено порівняння традиційного підходу оцінки стану мережі з чисельним імітаційним методом, що дозволяє підвищити точність та ефективність оцінки.

Практична

значимість. Виконана оцінка надійності геодезичної мережі м. Дніпро з використанням методу Монте-Карло.

У

результаті кожної ітерації у загальній кількості 5 100 згенеровано зміщення пунктів мережі та визначено ймовірність безвідмовної роботи ГМ. **Результати.** Чисельний імітаційний статистичний метод Монте-Карло

ґрунтується на стохастичному моделюванні випадкових величин і полягає у багаторазовому виконанні чисельних симуляцій (5 100 ітерацій) із використанням випадкових чисел, що відповідають середньоквадратичним похибкам положення геодезичних пунктів, для моделювання поведінки системи – геодезичної мережі. Застосування цього методу дало змогу отримати ймовірнісні значення середньоквадратичних похибок для кожного з 31 пункту Державної опорної геодезичної мережі м. Дніпро різної категорії точності. У кожній ітерації було визначено ймовірність безвідмовної роботи геодезичної мережі м. Дніпро, яка за результатами моделювання у середньому становить 82,5 %, що задовольняє очікуваному рівню надійності ($P \geq 80\%$), но є критичним.

Ключові слова: метод Монте-Карло; геодезична мережа; оцінка надійності; середня квадратична похибка положення пункту; ймовірність безвідмовної роботи; геодезичний моніторинг

RELIABILITY ASSESSMENT OF THE GEODETIC NETWORK OF DNIPRO USING THE MONTE CARLO NUMERICAL SIMULATION METHOD

BIEHICHEV S.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ISHUTINA H.S.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
CHUMAK L.O.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 965-93-71, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 518-42-54, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Department of Physics and Applied Mathematics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Dnipro Institute of Infrastructure and Transport", 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (095) 328-19-35, e-mail: larisa4umak@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

Abstract. The geodetic network is a fundamental basis for conducting topographic and geodetic works, construction, engineering surveys, mapping, and land cadastre management. A reliable, accurate, and stable network ensures the credibility and security of geospatial data. In cities with intensive economic activity, such as Dnipro, geodetic points are subjected to significant loads, which may lead to deformations, loss of stability, and reduced reliability of the geodetic network. Traditional methods for assessing the condition of the network are based on periodic measurements of point positions and the analysis of their displacements, which is a labor-intensive and time-consuming process. The application of the Monte Carlo method allows for the simulation of numerous possible scenarios of geodetic point displacements and the assessment of network reliability with high accuracy, taking into account both random and systematic measurement errors. This significantly reduces the time and effort required for data processing, enables the prediction of potential network issues, and supports the planning of priority measures for its maintenance and updating. **The purpose of the work** is to assess the reliability of the geodetic network of Dnipro using the Monte Carlo method to model possible displacements of geodetic points. The study includes an analysis of regulatory and legal documents on surveying geodetic networks, as well as foreign and domestic literature sources on the application of the Monte Carlo method in geodesy. **Methodology.** Application of the Monte Carlo method to model numerous scenarios of possible displacements of geodetic points. Consideration of random and systematic measurement errors for a more realistic assessment of network reliability. Comparison of numerical simulation results with data from periodic measurements using traditional methods to verify and evaluate the effectiveness of the approach. Analysis of results to predict potential deformations and plan measures for network maintenance and updating. **Scientific novelty.** For the first time, the Monte Carlo method has been applied for comprehensive modeling of possible displacements of geodetic points in urban conditions with high loads. The influence of random and systematic measurement errors on the reliability of the geodetic network has been determined. A comparison has been made between the traditional approach to assessing the network condition and the numerical simulation method, which allows improving the accuracy and efficiency of the assessment. **Practical value.** The reliability of the geodetic network of Dnipro was assessed using the Monte Carlo method. In each of the 5 100 iterations, displacements of network points were generated, and the probability of failure-free operation of the geodetic network was determined. **Results.** The numerical simulation statistical Monte Carlo method is based on stochastic modeling of random variables and consists in repeatedly performing numerical simulations (5 100 iterations) using random numbers corresponding to the root mean square errors of geodetic point positions to model the behavior of the system – the geodetic network. The application of this method made it possible to obtain probabilistic values of root mean square errors for each of the 31 points of the State Geodetic Network. In each iteration, the probability of failure-free operation of the geodetic network of the city of Dnipro was determined, which, according to the simulation results, averaged 82,5 %, satisfying the expected reliability level ($R \geq 80$ %).

Keywords: *Monte Carlo method; geodetic network; reliability assessment; root mean square error of point position; probability of failure-free operation або reliability probability; geodetic monitoring*

Постановка проблеми. Актуальність дослідження надійності геодезичних мереж (ГМ) зумовлена зростанням вимог до точності та стабільності геодезичних побудов у сучасних умовах розвитку

містобудування, інженерної інфраструктури та геоінформаційних систем. Геодезичні мережі є просторовою основою для виконання топографо-геодезичних, маркшейдерських і кадастрових робіт, тому

їх надійність безпосередньо впливає на якість проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів. Крім того, вплив техногенних і природних факторів, таких як деформації земної поверхні, зсувні процеси, сейсмічні явища та антропогенне навантаження, може призводити до порушення геометричної стабільності геодезичних пунктів. У зв'язку з цим виникає потреба в удосконаленні методів оцінювання надійності ГМ, зокрема із застосуванням сучасних чисельних і статистичних методів аналізу.

Проведення моніторингу пунктів геодезичних мереж є важливим показником забезпечення просторової стабільності та достовірності геодезичної основи держави. Регулярний контроль збереженості та положення пунктів ГМ дає змогу своєчасно виявляти їх пошкодження, зсуви або втрату внаслідок впливу природних і техногенних чинників, в тому числі внаслідок вандалізму.

На сучасному етапі моніторинг пунктів ГМ здійснюється із застосуванням супутникових GNSS-технологій, геоінформаційних систем і періодичних польових обстежень. Водночас у багатьох регіонах спостерігається недостатня регулярність оновлення даних, яке пов'язано з обмеженим фінансуванням та відсутністю єдиної державної автоматизованої системи контролю та обліку, що знижує стан геодезичних мереж.

У зв'язку з цим актуальним є вдосконалення методів моніторингу стану геодезичних мереж, впровадження науково обґрунтованої періодичності спостережень і сучасних статистичних підходів до аналізу результатів вимірювань.

Виділення невирішеної проблеми. Державна геодезична мережа (ДГМ) включає:

- геодезичну (планову) мережу, що включає УПМ ГНСС 1, 2, 3 класів;
- нівелірну (висотну) мережу, що включає мережі I, II, III та VI класів;
- гравіметричну мережу, що складається з фундаментальної мережі та мережі I класу;

- геодезичних мереж спеціального призначення.

Планова ДГМ забезпечує впровадження на всій території країни єдиної державної системи координат УСК-2000. Ось чому важливим є періодичний моніторинг (обстеження) пунктів державної геодезичної мережі та її оновлення у разі необхідності.

Відповідно до вимог Порядку [1] обстеження пунктів ДГМ полягає у встановленні їх місцезнаходження та перевірки стану основних конструктивних елементів. Згідно з Порядком [2] геодезичний моніторинг пунктів ДГМ здійснюється Держгеокадастром шляхом організації регулярних і періодичних перевірок їхнього технічного стану й охоплює контроль стану та стійкості її геодезичних пунктів, а також проведення спостережень за горизонтальними і вертикальними деформаціями земної поверхні та змінами значень прискорення вільного падіння в межах території держави.

Систематичне обстеження та актуалізація геодезичних пунктів ДГМ виконуються суб'єктами геодезичних робіт на відповідних територіях у процесі здійснення топографо-геодезичних робіт, земельно-кадастрових зйомок та інженерно-геодезичних вишукувань, що передбачають використання геодезичних пунктів, як вихідних.

Періодичний моніторинг за Порядком [2] здійснюється за необхідності, але не рідше одного разу на десять років, а в межах міст і територій з інтенсивною господарською діяльністю – щонайменше один раз на п'ять років.

За даними досліджень [3] складені таблиці 1 та 2 обстежень планової ДГМ України.

Аналіз результатів розподілу середніх квадратичних помилок (СКП) в геодезичній (плановій) мережі України показав, що із загальної кількості пунктів ДГМ (24 659 пунктів) найбільша їх кількість із СКП що знаходяться у межах від 2 до 3 см (34,1 %), а також від 3 до 4 см (25,2 %), найменша кількість пунктів із СКП, що знаходяться у

межах від 6 до 10 см (0,9 %), а також перевищують 10 см.

Таблиця 1

Геодезична (планова) мережа України [3]

Назви характеристик планової ДГМ	1 клас	2 клас	3 клас	Всього
Кількість пунктів	815	5679	18676	25198
Мінімальне відхилення	0,001	0,001	0,001	0,001
Максимальне відхилення	0,026	0,112	0,143	0,143
Середнє відхилення	0,003	0,020	0,032	0,028
Середнє квадратичне відхилення	0,002	0,007	0,013	0,012

Таблиця 2

Розподіл СКП у плановій ДГМ [3]

СКП	1 клас	2 клас	3 клас	Всього	%
0 – 1 см	805	316	848	1 969	8
1 – 2 см	8	2 738	1 280	4 026	16,3
2 – 3 см	2	2 219	6 193	8 414	34,1
3 – 4 см	0	189	6 026	6 215	25,2
4 – 5 см	0	80	2 978	3 058	12,4
5 – 6 см	0	30	729	759	3,1
6 – 10 см	0	13	202	215	0,9
Більше 10 см	0	1	2	3	0

У Додатках 1 та 2 Порядку [2] наведені основні вимоги до побудови геодезичної мережі 2 та 3 класу, що наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння вимог до побудови планових ДГМ 2 та 3 класу

Параметри мережі	2 клас	3 клас
СКП визначення положення пунктів, м	0,04–0,05	0,05
СКП вимірювання кутів, "	1	+1,5
СКП вимірювання сторони, м	0,04	0,05
Максимально допустима відносна похибка вимірювання сторони, ms/s	1:300 000	1:200 000

У Порядку [4] сказано, що СКП визначення координат пунктів ГМ спеціального призначення у межах

населених пунктів та промислових об'єктів не повинні перевищувати 0,05 м.

Якщо на основі даних таблиць 2 та 3 обрати стабільні пункти ДГМ, то їх загальна кількість складе:

1 клас – 815 пунктів;
2 клас – 5 462 пунктів;
3 клас – 17 325 пунктів.

Всього – 23 680 стабільних пунктів.

Розрахуємо надійність планової ДГМ України, ймовірність її безвідмовної роботи:

$$P = \frac{23680}{24659} \cdot 100 \% = 95,7 \%$$

За умови $P \geq 90 \%$ можна зробити висновок, що планова ДГМ України знаходиться у надійному стані.

Щодо стану загальнодержавної геодезичної мережі, стан регіональних мереж може відрізнитися і тому актуальним питанням є, особливо для регіонів з інтенсивною інженерною діяльністю, виконувати своєчасну оцінку надійності їх пунктів. Тому розглянемо та проаналізуємо стан ГМ м. Дніпро за результатами геодезичного моніторингу та стохастичного моделювання відмов методом Монте-Карло.

За умови $P \geq 90 \%$ можна зробити висновок, що планова ДГМ України знаходиться у надійному стані.

Стан регіональних геодезичних мереж, особливо для регіонів з інтенсивною інженерною діяльністю, може відрізнитися від загальнонаціональних мереж, у зв'язку з чим актуальним є виконання своєчасної оцінки надійності їх пунктів. Тому доцільно розглянути та проаналізувати стан ГМ м. Дніпро за результатами геодезичного моніторингу та стохастичного моделювання відмов методом Монте-Карло.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації [5] проаналізовано засади застосування методу Монте-Карло для дослідження складових похибок (як систематичних, так і випадкових) геодезичних приладів. Для оцінювання впливу окремих компонентів систематичної похибки запропоновано використання коефіцієнтів кореляції Пірсона та побудованої на їх основі кореляційної

матриці. Визначено у відсотках співвідношення основних параметрів, що враховують випадкові та систематичні похибки. Розроблено масштабовану модель, що дає змогу здійснювати аналітичну й графічну оцінку впливу складових систематичної похибки на точність вимірювань. Виконані розрахунки підтвердили доцільність і коректність застосування запропонованої масштабованої моделі для аналізу точності вимірювань геодезичними приладами.

У статті [6] автори пропонують доповнити традиційні методи врівноваження геодезичних мереж, використавши двоетапний аналіз для оцінювання невизначеності результатів. На першому етапі розглядаються початкові вимірювання та чинники, які можуть на них впливати. Для цього застосовується підхід до оцінювання невизначеності за рекомендаціями GUM «Guidelines to the Expression of Uncertainty in Measurements», що є стандартним довідником у сфері моделювання невизначеності. Другий етап полягає у використанні моделювання методом Монте-Карло. Багаторазово імітується весь процес обробки даних: починаючи від початкових вимірювань і їх попередньої обробки і до врівноваження та оцінки якості результатів.

У GUM усі джерела невизначеності поділяються на «тип А» і «тип В». Невизначеності «типу А» визначаються за допомогою класичних статистичних методів, тоді як невизначеності «типу В» пов'язані з іншими чинниками, такими як досвід роботи з приладом та аналіз його точнісних характеристик. Обидва типи невизначеностей можуть містити випадкові та систематичні складові похибок.

У дослідженні Neumann I., Alkhatib H., Kutterer H. [7] основну увагу приділено критичному порівнянню методів Монте-Карло та нечітких методів у процесі поширення різних видів невизначеностей, особливо «типу В». Якщо метод Монте-Карло розглядає всі невизначеності як випадкові, то нечіткі методи розрізняють випадкові та систематичні похибки.

Випадкові складові моделюються в стохастичній формі, а систематичні невизначеності опрацьовуються за допомогою нечітких методів. Запропонована процедура у роботі [7] описується з наведенням теоретичних положень і числового прикладу оцінювання невизначеності на прикладі застосування лазерного сканування.

Стандартне відхилення значення нелінійної функції може бути визначене за законом поширення коваріації. Існуючі методи поширення коваріації для нелінійних моделей мають низку недоліків: метод апроксимації функції потребує складних операцій диференціювання, а метод Монте-Карло характеризується великою обчислювальною затратністю та низькою швидкістю збіжності.

Для усунення цих недоліків у роботі [8] запропоновано використання методу квазі-Монте-Карло (КМК) та розроблено процедуру його реалізації для поширення коваріації як за незалежних, так і за корельованих спостережень. З урахуванням того, що метод квазі-Монте-Карло не дозволяє ефективно збалансувати кількість симуляцій і точність результатів, запропоновано новий алгоритм КМК для малої кількості пакетних симуляцій – адаптивний квазі-Монте-Карло (АКМК).

Методи КМК та алгоритм АКМК застосовано для задач прямої засічки та поширення коваріації вектора базової лінії GNSS у геодезичних вимірюваннях. Отримані у роботі [8] результати підтверджують ефективність методу КМК та алгоритму АКМК. Метод АКМК дозволяє підвищити обчислювальну ефективність майже на 84,4 %. Запропонований підхід відкриває нові можливості для поширення коваріації в нелінійних моделях.

У публікації [9] запропонований новий спосіб точного налаштування (масштабування) базисів для електронних далекомірів. Метод перевіряють і оцінюють за допомогою комп'ютерних симуляцій Монте-Карло, щоб врахувати всі можливі похибки та зробити результати більш надійними. Завдяки використаній

методології отримані параметри без помилок. Методи, описані у дослідженні [9], базуються на ітеративно зваженому методі найменших квадратів і можуть використовуватися як для оцінки параметрів, так і для виявлення викидів. Це особливо важливо для калібрування електромагнітних дальномірів за допомогою моделювання методом Монте-Карло та вимірних тестових базисів. Результати показали, що однією з переваг застосованої методики є підвищення надійності оцінених калібрувальних параметрів. Оцінка за методом найменших квадратів може бути спотворена систематичними та несистематичними помилками, що призводить до упередженості оцінених параметрів.

Визначення точності функцій від вимірних або скоригованих значень може бути проблемою у геодезичних обчисленнях. Для цього зазвичай використовують загальний закон поширення коваріації або, у випадку некорельованих спостережень, поширення дисперсії (формулу Гаусса). Такий підхід теоретично обґрунтований для лінійних функцій.

У випадку нелінійних функцій зазвичай застосовують розкладання першого порядку ряду Тейлора, проте це рішення може містити похибку через відкидання вищих порядків. Метою дослідження [10] було визначення того, наскільки можна застосовувати загальний закон поширення дисперсії для нелінійних функцій, що використовуються у базових геодезичних обчисленнях.

У статті [10] наведено помилки, що виникають через нехтування вищими порядками, і визначено межі допустимих спрощень. Основою аналізу є порівняння результатів, отриманих за законом поширення дисперсії, та ймовірнісним підходом, а саме симуляціями Монте-Карло.

Симуляції та аналіз результатів підтверджують можливість застосування загального закону поширення дисперсії у базових геодезичних обчисленнях навіть для нелінійних функцій. Єдина умова – це достатня точність спостережень, яка, як

правило, не є проблемою при використанні сучасних геодезичних приладів.

Аналіз літературних джерел показав актуальність застосування методу Монте Карло для оцінювання параметрів точності геодезичних вимірювань і відкриває напрям його використання для формування методології оцінки надійності стану геодезичних мереж.

Метою роботи є оцінка надійності геодезичної мережі м. Дніпро шляхом застосування методу Монте-Карло.

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів. У 2011 р. ДП «Науково-дослідним інститутом геодезії і картографії» було виконано:

– обстеження та відновлення 79 пунктів існуючої ДГМ, побудованої у 1954–1961 р. на території м. Дніпропетровська (рис. 1);

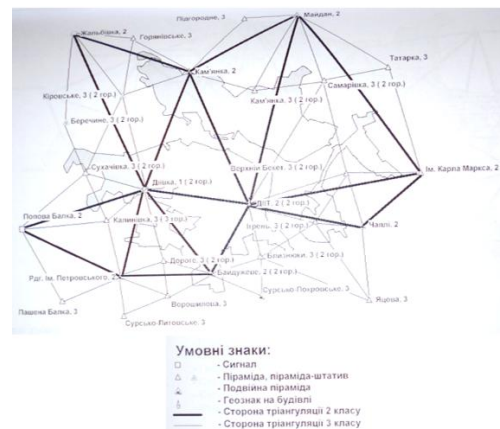


Рис. 1. Схема ДГМ в м. Дніпропетровськ (1954 р.) (з 2016 р. м. Дніпро.)

– обстеження та відновлення 3 519 пунктів існуючої міської мережі 4 класу та 1, 2 розрядів (рис. 2);

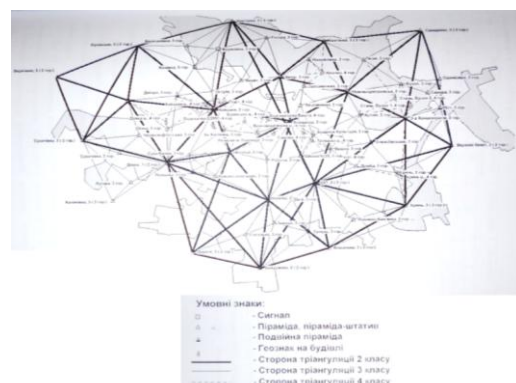


Рис. 2. Схема побудованої міської триангуляції м. Дніпропетровськ (1954 р.) (з 2016 р. м. Дніпро.)

- обстеження та відновлення 944 нівелірних знаків;
- закладка 82 супутників-пунктів ДГМ;
- закладка 2243 пунктів міської ГМ із стінними знаками;
- визначення координат 251 пункту супутниковими методами у статичному режимі;
- лінійно-кутові вимірювання на 1 750 пунктах міської ГМ 1 розряду;
- нівелювання III–IV класів і технічне нівелювання (720 пог. км);
- опрацювання GPS-спостережень 1, 2, 3 і 4 класів (251 пункт);
- вимірювання міської ГМ та обчислення координат 1750 пунктів;
- складання каталогів пунктів ДГМ та міської ГМ у місцевій системі координат (3 515 пункти);
- складання технічного звіту з реконструкції міської ГМ.

Геодезична основа м. Дніпро включає:

- сегмент Української постійнодіючої мережі спостережень Глобальних навігаційних супутникових систем (УПМ ГНСС);
- ДГМ 1 класу;
- триангуляцію та полігонометрію 2–4 класів ДГМ;
- міську триангуляцію 2–4 класів та полігонометрію 4 класу, 1, 2 розрядів міської ГМ;
- висотну основу у вигляді нівелірних мереж I, II та III класів.

Координати пунктів УПМ ГНСС та ДГМ 1 класу обчислені у Світовій земній референційній системі на епоху 2000 року (ITRS/ ITRS2000) та УСК-2000.

Координати пунктів триангуляції та полігонометрії 2–4 класів ДГМ обчислені в системі координат 1942 року та УСК-2000. Координати пунктів міської триангуляції та полігонометрії 4 класу та 1, 2 розрядів міської ГМ обчислені у місцевій системі координат м. Дніпропетровськ на епоху 1961 року.

З метою модернізації міської геодезичної мережі м. Дніпро було виконано комплекс геодезичних робіт з часткового обстеження пунктів ДГМ та міської триангуляції у

кількості 33 пунктів. Перевага під час обстеження була надана пунктам, до яких був забезпечений вільний доступ, тобто пункти, що були закладені на будівлях, не обстежувалися. Всі обстежені пункти збереглися. На 31 обстежених пунктах ДГМ та міської триангуляції було виконано супутникові геодезичні обстеження, при цьому СКП обчислених координат не перевищили 0,02 м.

Відомості про обстежені пункти ДГМ наведені у таблиці 4.

Таблиця 4

Список обстежених пунктів ДГМ 1, 2, 3, 4 класів на території м. Дніпро

№ з/п	Назва	клас	тип знаку	Зберігся	
				знак	центр
1	Байдужево	2	пір.	так	так
2	Берег	3 гор.	пір.	ні	так
3	Березанівка	3 гор.	пір.	так	так
4	Беречине	3	пір.	так	так
5	Верхній Бекет	3	пір.	так	так
6	Ворошилова	3	пір.	ні	так
7	Горяннівське	3	пір.	ні	так
8	Гостра	3 гор.	пір.	так	ні
9	Дамба	3 гор.	пір.	ні	так
10	Діївка	3 гор.	пір.	так	так
11	Дороге	3	пір.	ні	так
12	Жальбівка	2	б.з.з.	ні	так
13	Ім. К.Маркса	1	б.з.з.	ні	так
14	Калинівка	3	пір.	так	так
15	Кам'янка	2	б.з.з.	ні	так
16	Лоцмано-Кам'янка (нова)	4 гор.	пір.	так	так
17	Лугова	3 гор.	пір.	ні	так
18	Одинковка	3 гор.	пір.	ні	так
19	Пашена Балка	3	пір.	ні	так
20	Підгородне	3	пір.	так	так
21	Польовий	3 гор.	пір.	ні	ні
22	Попова Балка	2	пір.	ні	так
23	Рдг.ім. Петр-го	1	пір.	так	так
24	Сурсько-Лит-ке	3	пір.	ні	ні
25	Сурсько-Покровське	3	пір.	так	так
26	Сухачівка	3 гор.	пір.	ні	так
27	Східний	4 гор.	пір.	так	так
28	Татарка Нова	4 гор.	пір.	ні	так
29	Чаплі	2	пір.	так	так
30	Червонофлотськ а	3 гор.	пір.	так	так
31	Яцова	3	пір.	ні	так

Всього із 31 пунктів ДГМ на території м. Дніпро (табл. 4): 1 клас – 2 пункти; 2 клас

– 5 пунктів; 3 клас – 21 пункт; 4 клас – 3 пункти. У 12 пунктів із 31 збереглися і центр і знак; у двох пунктів відсутній центр і знак за результатами пошуку; у решти пунктів збереглися або центр або знак.

Серед 204 обстежених пунктів міської ГМ м. Дніпро виявились знищеними 61 пункт. Якщо врахувати, що інші 143 пункти зберегли стали положення координат, або мають середню квадратичну помилку в межах допуску, то в такому випадку ймовірність безвідмовної роботи міської ГМ буде: $P = 143/204 = 0,7 = 70 \%$. У більшості випадків під впливом техногенних та природних чинників відбуваються зміни просторового положення пунктів геодезичних мереж, а іноді їх знищення, тому потрібно систематично проводити геодезичний моніторинг з обстеженням стану пунктів та відновлювати їх для забезпечення безвідмовної роботи геодезичної мережі.

Для оцінки надійності геодезичної мережі м. Дніпро за методом Монте-Карло було згенеровано 5 100 вибірок для моделювання ймовірнісних процесів втрати

стійкого, незмінного положення геодезичних пунктів планової мережі.

Комплексний вплив техногенних та природних чинників викликає зміщення геодезичних пунктів, а іноді й знищення їх, що призводить до зниження надійності геодезичної мережі. Оцінено ймовірність безвідмовної роботи ГМ на рівні не менше 80 % за умови наявності випадкових відхилень у плановому положенні пунктів мережі, що перевищують граничні значення для даного класу точності у кожній з 5 100 згенерованих ітерацій.

Розрахунок загальної СКП положення кожного пункту геодезичної мережі м. Дніпро здійснено за формулою:

$$M = \pm\sqrt{M_x^2 + M_y^2}, \tag{1}$$

де M_x, M_y – СКП координат пункту.

Були введені наступні критерії відбору допустимих значень СКП положення геодезичних пунктів на рівні не більше 0,03 м для 1 класу; не більше 0,04 м для 2 класу та не більше 0,05 м для 3–4 класу.

Результати обчислень виконані у таблиці Excel (рис. 3).

1 пункт	А	В	С	Д	Е	Г	Н	І	К	Л	М	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW		
№ з/п	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	п	Р	
3	1	0,01	0,02	0,02	1	0,02	0,02	0,031	0	0,05	0,02	0,049	0	0,018	0,008	0,02	1	0,046	0,03	0,053	0	0,05	0,01	0,053	0	0,06	0,04	0,0722	0	23	0,742
4	2	0,01	0,01	0,01	1	0,02	0,02	0,03	1	0,01	0,03	0,033	1	0,03	0,03	0,042	1	0,033	0,05	0,057	0	0,05	0,04	0,0625	0	0,06	0,03	0,0641	0	26	0,839
5	3	0,02	0,02	0,02	1	0	0,01	0,014	1	0,01	0,03	0,029	1	0,029	0,008	0,03	1	0,018	0,06	0,062	0	0,05	0,05	0,0716	0	0,01	0,04	0,042	1	27	0,871
6	4	0,02	0,02	0,03	1	0	0,01	0,008	1	0,04	0,03	0,053	0	0,022	0,026	0,034	1	0,031	0,04	0,05	1	0,01	0,07	0,07	0	0,01	0,06	0,063	0	26	0,839
7	5	0,02	0,02	0,03	1	0,01	0,01	0,011	1	0,03	0,02	0,033	1	0,023	0,003	0,023	1	0,019	0,05	0,053	0	0,03	0,04	0,0517	0	0,05	0,06	0,0711	0	26	0,839
8	6	0,03	0,01	0,03	1	0,02	0	0,02	1	0,01	0,02	0,021	1	0,009	0,027	0,028	1	0,056	0,07	0,089	0	0,02	0,03	0,0394	1	0,06	0,06	0,0905	0	28	0,903
9	7	0,03	0,01	0,03	1	0,01	0,01	0,012	1	0,05	0	0,048	0	0,006	0,013	0,014	1	0,014	0,04	0,041	1	0,04	0	0,0351	1	0,04	0,04	0,0559	0	26	0,839
10	8	0,02	0,03	0,03	1	0,02	0,02	0,023	1	0,04	0,04	0,057	0	0,025	0,021	0,033	1	0,049	0,02	0,052	0	0	0	0,002	1	0,03	0,06	0,0664	0	26	0,839
11	9	0,02	0	0,02	1	0,01	0,01	0,013	1	0,05	0,03	0,059	0	0,027	0,024	0,036	1	0,048	0,03	0,059	0	0,07	0,02	0,0723	0	0,04	0,05	0,0644	0	24	0,774
12	10	0	0,01	0,01	1	0,01	0,02	0,021	1	0,02	0,04	0,043	0	0,025	0,018	0,031	1	0,044	0,02	0,049	1	0,03	0,04	0,0514	0	0,04	0,06	0,0734	0	27	0,871
13	11	0,01	0,01	0,02	1	0	0,02	0,021	1	0	0,02	0,022	1	0,013	0,004	0,014	1	0,027	0	0,027	1	0,06	0,06	0,0835	0	0,03	0,01	0,0361	1	27	0,871
14	12	0	0,01	0,01	1	0,01	0,01	0,013	1	0,05	0,02	0,053	0	0,026	0,01	0,028	1	0,061	0,07	0,093	0	0,01	0,06	0,0622	0	0,02	0,07	0,0687	0	25	0,806
15	13	0,02	0	0,02	1	0,02	0,01	0,018	1	0,05	0	0,046	0	0,008	0,005	0,009	1	0,069	0,03	0,077	0	0,01	0,04	0,0369	1	0,02	0,05	0,0565	0	27	0,871
16	14	0,01	0,01	0,01	1	0	0,01	0,014	1	0,02	0,03	0,03	1	0,019	0,019	0,035	1	0,038	0,04	0,054	0	0,06	0,06	0,0835	0	0,07	0,01	0,0692	0	25	0,806
17	15	0,02	0,02	0,02	1	0,02	0,03	0,034	0	0,04	0,02	0,043	0	0,015	0,025	0,029	1	0,064	0,06	0,086	0	0,03	0,06	0,0662	0	0,06	0,03	0,0647	0	25	0,806

Рис. 3. Фрагмент таблиці Excel з розрахунками СКП положення пунктів ДГМ на території м. Дніпро

Генерування численних сценаріїв із систематичними й випадковими похибками (рис. 3), дозволяє отримати розподіл

можливих результатів СКП місцеположення геодезичних пунктів різних класів (елементів технічної системи) та оцінити надійність ГМ

(технічної системи), тобто ймовірність її безвідмовної роботи.

У стовпцях «Е», «І» з надписом «допуск» (рис. 3) цифра «0» означає, що не виконується умова $M < 0,03$ м СКП для пунктів 1 класу (ім. К. Маркса, Рдг ім. Петровського), цифра «1» – умова виконується. Аналогічно для пунктів 2 класу допуск на СКП буде $M < 0,04$ м, що позначено «0» або «1» наведено у стовпцях «М», «Q», тощо (пункти Байдужеве, Жальбівка та ін.) (рис. 3). Для пунктів 3 та 4 класу, допуск на похибку буде $M < 0,05$ м.

Для кожної ітерації розрахована у останній колоночці «DW» (рис. 3) ймовірність настання сприятливої події за формулою:

$$P = \frac{n}{N} \cdot 100 \% \quad (2)$$

За результатами моделювання 5 100 ітерацій СКП для 31 геодезичного пункту обчислено середнє значення ймовірності бевідмовної роботи геодезичної мережі на рівні 82,5 %, що задовольняє очікуваному критерію 80 %, але є критичним. Аналіз статистичних даних показав, що найбільший вплив на безвідмовну роботу ГМ будуть мати саме пункти 3 класу, оскільки їх кількість найбільша – 21 із 31. Крім того, пункти 3-го та 4-го класів найбільш активно використовуються для подальшого розвитку та згущення геодезичних мереж. Саме на їх основі виконується створення знімальних та інженерно-геодезичних мереж, що зумовлює підвищені вимоги до їх точності, стабільності та надійності. Тому забезпечення відновлення належного точного та технічного стану виявлених пунктів цих класів має важливе значення для ефективного функціонування всієї геодезичної інфраструктури.

Висновки та перспективи розвитку напрямку. Застосований чисельний імітаційний статистичний метод Монте-Карло базується на стохастичному моделюванні випадкових величин, суть якого заключається в багаторазовому виконанні симуляції (5 100 раз) з використанням випадкових чисел (СКП

положення геодезичних пунктів) для моделювання поведінки системи (ГМ).

Застосування цього методу дало змогу отримати ймовірнісні значення СКП для кожного з 31 пунктів ДГМ, розташованої на території м. Дніпро. У кожній ітерації було розраховано ймовірність безвідмовної роботи геодезичної мережі міста, яка за результатами моделювання становить 82,5 %.

Для забезпечення надійного функціонування ГМ міста доцільно виконувати попередню комплексну оцінку її точності та надійності на всій території. Особливу увагу слід приділяти проведенню повторних спостережень і перевірці фактичного стану геодезичних пунктів із використанням сучасних супутникових технологій, що дозволяє своєчасно виявляти зміщення або втрату стабільності пунктів. Доцільним є також виконання попередньої оцінки надійності ГМ в окремих районах міста, зокрема в зонах з підвищеним техногенним навантаженням, де спостерігаються максимальні значення зміщень геодезичних пунктів. Отримані результати можуть бути використані як для наукових досліджень, так і для практичних потреб – зокрема, для вибору стабільних і надійних геодезичних пунктів під час виконання топографо-геодезичних зйомок або проведення геодезичного моніторингу інженерних споруд та будівель, що забезпечить достовірність результатів. Крім того, результати дослідження можуть бути використані як основа для планування робіт по відновленню зміщених пунктів, розвитку та згущення ГМ, оптимізації розміщення нових пунктів, а також для підвищення точності інженерно-геодезичних і кадастрових робіт.

Запропонований підхід дозволяє своєчасно виявляти проблемні ділянки мережі, прогнозувати можливі зміщення пунктів у зонах підвищеного техногенного навантаження та приймати обґрунтовані рішення щодо проведення повторних спостережень, оновлення або відновлення геодезичних пунктів. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню надійності

геопросторових даних і безпеки виконання геодезичних робіт у межах міських техногенно-навантажених територій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Порядок обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text>
2. Порядок побудови Державної геодезичної мережі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#n9>
3. Висотенко Р. О. Сучасний стан Державної геодезичної мережі. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/vysotenko_suchasnyj-stan-dgm_2024.pdf
4. Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25#Text>
5. Сосса Б., Гавришчук В. Використання методу Монте-Карло при дослідженні похибок геодезичних приладів. *Технічні науки та технології*. 2025. № 2 (40). С. 472–484. URL: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/337222/325780>
6. Niemeier W., Tengen D. Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and Monte-Carlo-simulations. *Journal of Applied Geodesy*. 2017. Vol. 11 (2). URL: <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0017>
7. Neumann I., Alkhatib H., Kutterer H. Comparison of Monte-Carlo and Fuzzy Techniques in Uncertainty Modelling. *FIG Symposium on Deformation Analysis*. Vol. 13. Lisboa, 2018. URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/2008/lisbon_2008_comm6/papers/pas03/pas03_04_neumann_mc083.pdf
8. Siebert B., Sommer K.-D. Weiterentwicklung des GUM und Monte-Carlo-Techniken. *Technisches Messen*. 2004. Vol. 71. Pp. 67–80. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224121010423?via%3Dihub>
9. Ramazan Cunejt Erenoglu. A Novel Robust Scaling for EDM Calibration Baselines using Monte Carlo Study. *Tehnicki vjesnik – Technical Gazette*. 2018. Vol. 25 (1). URL: <https://doi.org/10.17559/tv-20160407214150>
10. Wyszowska P. Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations. *Geodesy and Cartography*. 2017. Vol. 66 (2). Pp. 333–346. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322378849>
Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations

REFERENCES

1. *Poriadok obstezhennia ta onovlennia punktiv Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [Procedure for the Survey and Updating of the State Geodetic Network Points]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text> (in Ukrainian).
2. *Poriadok pobudovy Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [Procedure for the Establishment of the State Geodetic Network]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#n9> (in Ukrainian).
3. Vysotenko R.O. *Suchasnyi stan Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [The Current State of the State Geodetic Network]. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/vysotenko_suchasnyj-stan-dgm_2024.pdf (in Ukrainian).
4. *Poriadok topografichnoi ziomky u masshtabakh 1:5000, 1:2000, 1:1000 ta 1:500* [Procedure for Topographic Surveying at Scales 1:5000, 1:2000, 1:1000 and 1:500]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25#Text> (in Ukrainian).
5. Sossa B. and Havryshchuk V. *Vykorystannia metodu Monte-Karlo pry doslidzhenni pokhybok heodezychnykh pryladiv* [Application of the Monte Carlo Method in the Study of Errors of Geodetic Instruments]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* [Engineering Sciences and Technologies]. 2025, no. 2 (40), pp. 472–484. URL: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/337222/325780> (in Ukrainian).
6. Niemeier W. and Tengen D. Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and Monte-Carlo-simulations. *Journal of Applied Geodesy*. 2017, vol. 11 (2). URL: <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0017>
7. Neumann I., Alkhatib H. and Kutterer H. Comparison of Monte-Carlo and Fuzzy Techniques in Uncertainty Modelling. *FIG Symposium on Deformation Analysis*. Lisboa, 2018, vol. 13. URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/2008/lisbon_2008_comm6/papers/pas03/pas03_04_neumann_mc083.pdf
8. Siebert B. and Sommer K.-D. Weiterentwicklung des GUM und Monte-Carlo-Techniken. *Technisches Messen*. 2004, vol. 71, pp. 67–80. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224121010423?via%3Dihub>
9. Ramazan Cunejt Erenoglu. A Novel Robust Scaling for EDM Calibration Baselines using Monte Carlo Study. *Tehnicki vjesnik – Technical Gazette*. 2018, vol. 25 (1). URL: <https://doi.org/10.17559/tv-20160407214150>
10. Wyszowska P. Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations. *Geodesy and Cartography*. 2017, vol. 66 (2), pp. 333–346. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322378849>
Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations

Надійшла до редакції: 28.02.2026.