ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М.БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ БУДІВНИЦТВА,
ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ЦИВІЛЬНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

Кафедра земельного адміністрування та геоінформаційних систем

Пояснювальна записка

до дипломної роботи бакалавра

на тему: **«СТВОРЕННЯ ПРОЄКТУ ПЛАНОВО-ВИСОТНОЇ ОСНОВИ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА В МІСТІ ХАРКІВ»**

Виконав: студент 4 курсу групи ГКЗ 2022-1
спеціальності 193 Геодезія та землеустрій
ОП Геодезія, картографія та землеустрій

Рудницький Ілля Артемович

Керівник Кухар Максим Анатолійович

Рецензент Мамонов Костянтин Анатолійович

2026 року

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут будівництва, землеустрою та цивільної інженерії
Кафедра земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
Освітня програма Геодезія, картографія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЗА та ГІС
проф. Мамонов К. А.
Восстановимая подпись
X
Подписано: f054cc53-ba06-45d3-8422-a8d59cd399bb
«25» травня 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Рудницькому Іллі Артемовичу

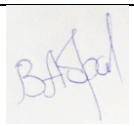
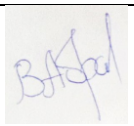
1.Тема проєкту (роботи): Створення проєкту планово-висотної основи для будівництва в місті Харків
керівник проєкту (роботи) к.т.н., доцент Кухар Максим Анатолійович,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 22.05.2026 року № 441-03.
2. Строк подання студентом проєкту (роботи): 18 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): картографічні матеріали міста Харків.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки обґрунтувати актуальність дослідження; проаналізувати сучасний стан планово-висотного геодезичного забезпечення містобудівної діяльності й довести необхідність його модернізації; обґрунтувати та виконати математичний розрахунок очікуваної точності висотної основи будівельного майданчика; розробити комплексні заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час проведення польових і камеральних геодезичних робіт.

5. Перелік графічного матеріалу: схема планово-висотної геодезичної основи на території міста Харків; схеми планово-висотної геодезичної мережі згущення.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Нормативно-правова база створення планово-висотної геодезичної основи	Кухар М.А., доцент кафедри ЗА та ГІС		
2. Методичне та технічне забезпечення створення проєкту планово-висотної геодезичної мережі	Кухар М.А., доцент кафедри ЗА та ГІС		
3. Проєктування планово-висотної геодезичної мережі для будівельного майданчика в місті Харків	Кухар М.А., доцент кафедри ЗА та ГІС		
4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Абракітов В. Е., доцент кафедри ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання: 25 травня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Формування інформаційної бази	25.05.26	
2.	Розробка та написання першого розділу роботи	03.06.26	
3.	Розробка та написання другого розділу роботи	09.06.26	
4.	Розробка та написання третього розділу роботи	12.06.26	
5.	Розробка та написання розділу з охорони праці	15.06.26	
6.	Оформлення роботи	18.06.26	
7.	Попередній захист роботи		
8.	Захист дипломної роботи у ДЕК		

Студент Рудницький І.А.

Керівник проєкту (роботи) Кухар М.А.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 91 с., 6 рис., 25 джерел, 15 слайдів презентації.

ПЛАНОВО-ВИСОТНА ОСНОВА, ГЕОДЕЗИЧНА МЕРЕЖА ЗГУЩЕННЯ, ГЕОДЕЗИЧНИЙ ЧОТИРИКУТНИК, МЕТОД НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ, СУПУТНИКОВІ GNSS-ТЕХНОЛОГІЇ, ВРІВНОВАЖЕННЯ ВИМІРІВ, ВІДБУДОВА ІНФРАСТРУКТУРИ.

Об’єкт дослідження - процес створення планово-висотної геодезичної основи для будівництва в умовах складної міської забудови.

Предмет дослідження - технологічні рішення із застосуванням GNSS-обладнання, оптико-електронних приладів та математичних методів корелатного врівноваження надлишкових вимірів.

Мета роботи - розробка та математичне обґрунтування оптимального проєкту планово-висотної геодезичної мережі для будівельного майданчика в м. Харків із застосуванням суворого методу найменших квадратів.

Методи дослідження - методи математичної обробки геодезичних вимірів (метод найменших квадратів, корелатне врівноваження з множниками Лагранжа, формула Ферреро), супутникові спостереження GNSS, загальнонаукові методи аналізу та синтезу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці матричного алгоритму врівноваження та формуванні підсумкового каталогу координат і висот. Це забезпечує необхідну геометричну точність і стабільність геодезичної основи для безпечного зведення об'єктів та повоєнного відновлення міської інфраструктури.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
1 НОРМАТИВНО-ПРАВОВА БАЗА СТВОРЕННЯ ПЛАНОВО-ВИСОТНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ ОСНОВИ 9
1.1 Структура Державної геодезичної мережі 9
1.2 Геодезична планова мережа 18
1.3 Нівелірна (висотна) мереж 31
1.4 Постановка задачі 38
2 МЕТОДИЧНЕ ТА ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТВОРЕННЯ ПРОЄКТУ ПЛАНОВО-ВИСОТНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ 41
2.1 Методичне забезпечення формування планової геодезичної основи в будівництві 41
2.2 Методичне забезпечення формування висотної геодезичної основи в будівництві 45
2.3 Типи геодезичних знаків та методика їх закладання в міських умовах 54
2.4 Типи геодезичних знаків та методика їх закладання в міських умовах 61
2.5 Особливості математичної обробки геодезичних мереж в сучасних умовах 67
3 ПРОЄКТУВАННЯ ПЛАНОВО-ВИСОТНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНОГО МАЙДАНЧИКА В МІСТІ ХАРКІВ 72
3.1 Формування схеми та обґрунтування планово-висотної основи мережі будівельного майданчика 72
3.2 Проєктування планової геодезичної основи майданчика 77
3.3 Проєктування висотної геодезичної основи майданчика 81
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 84
4.1 Охорона праці при виконанні польових геодезичних робіт 84
4.2 Охорона праці при виконанні польових геодезичних робіт 86

ВИСНОВКИ 87
СПИСОК ДЖЕРЕЛ 89

ВСТУП

Дипломний проєкт розроблено на основі актуальних інженерно-геодезичних потреб сучасного містобудування, у роботі проведено детальний аналіз існуючих підходів та запропоновано комплексні покращення для геодезичного забезпечення. Проєкт є дуже актуальним, оскільки точна та інтегрована геодезична мережа виступає базовим фундаментом для будь-якого етапу зведення споруд, а подібні завдання з модернізації та розширення планово-висотної основи постають перед фахівцями регулярно через безперервний розвиток інфраструктури.

Сучасний Харків - це великий мегаполіс, який продовжує свій інтенсивний розвиток. Більшість його унікальних інженерних та архітектурних об'єктів уже багато років є гордістю місцевих жителів і займають важливе місце в повсякденному житті міста. Зараз практично неможливо уявити архітектурний вигляд Харкова без споруд, які стали його справжньою візитною карткою, таких як Харківський академічний театр опери та балету ім. Лисенка, перший в Україні 24-х поверховий житловий будинок, Палац спорту «Ювілейний», легендарний фонтан «Дзеркальний струмінь», а також відтворена у своєму первісному вигляді арка центрального парку та реконструйована будівля філармонії. Якісне зведення нових житлових і промислових комплексів, а також надійна реконструкція наявної забудови вимагають суворого дотримання геометричних параметрів, що безпосередньо гарантується лише за умови створення високоточної планово-висотної основи.

Рельєф досліджуваної території міста Харкова характеризується різноманіттям, сформованим унаслідок геологічних процесів, а його сучасна спрямованість розвитку проходить переважно під дією екзогенних сил та інтенсивної людської діяльності. Техногенне перетворення місцевості та зведення великих об'єктів інфраструктури суттєво змінюють природний ландшафт і здатні провокувати небезпечні явища, такі як ерозія ґрунтів, зсувні процеси чи підтоплення навколо міських водойм і долин річок. Вивчення

динаміки рельєфу дозволяє встановити сучасні закономірності його зміни, що є ключовим елементом оцінки сприятливості території для безпечного розміщення житлової забудови. У зв'язку з цим, проектування стабільної геодезичної основи має спиратися на детальний геоінформаційний аналіз та цифрові моделі рельєфу. Використання сучасних даних дистанційного зондування Землі, отриманих зокрема через відкриті сервіси на зразок USGS, дозволяє врахувати всю необхідну інформацію про динаміку земної поверхні та вжити профілактичних інженерних заходів ще на етапі геодезичного проєктування.

Метою даної роботи є розробка та обґрунтування проєкту планово-висотної основи для будівництва в місті Харків із застосуванням сучасних методів геоінформаційного аналізу та цифрового моделювання рельєфу задля виявлення процесів вимірювань, які можна оптимізувати, та впровадження конкретних високоточних способів їх вдосконалення.

1 НОРМАТИВНО-ПРАВОВА БАЗА СТВОРЕННЯ ПЛАНОВО-ВИСОТНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ ОСНОВИ

1.1 Структура Державної геодезичної мережі

Правові, організаційні та економічні засади діяльності у сфері геодезії, топографії та картографії на загальнодержавному рівні регулюються Законом України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність». Відповідно до положень статті 8 цього базового законодавчого акта, державне регулювання спрямоване на створення умов для забезпечення інтересів оборони, безпеки, економіки та розвитку інфраструктури країни. На виконання цих стратегічних завдань в Україні функціонує Державна геодезична мережа, яка визначається як головна геометрична та координатно-висотна основа території держави. Вона являє собою цілісну, математично узгоджену сукупність геодезичних пунктів, що рівномірно та планомірно розміщені по всій площі країни для формування єдиного геопросторового середовища (рис. 1.1).

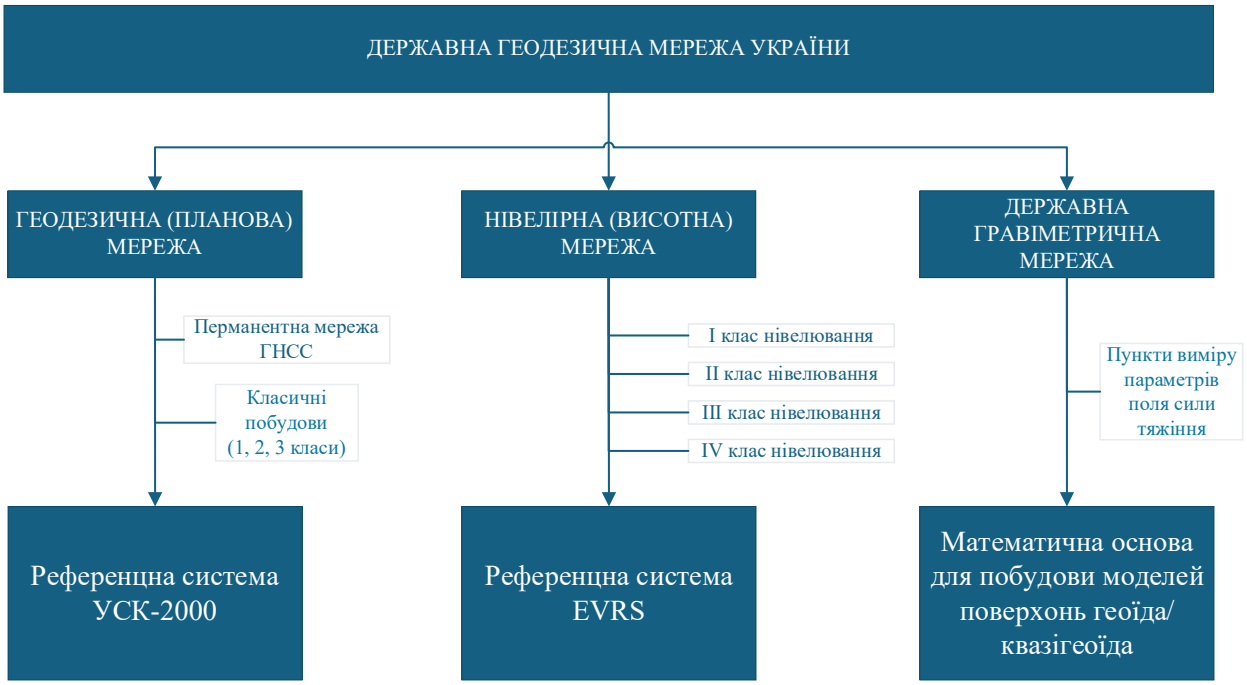


Рисунок 1.1 – Схема структури Державної геодезичної мережі

Головне призначення цієї системи має багатовекторний характер: вона забезпечує стабільне поширення єдиної державної системи координат, єдиної системи висот та державної гравіметричної системи, а також слугує базовою вихідною основою для проєктування та розгортання будь-яких інших геодезичних мереж спеціального призначення, локальних мереж згущення та знімальних мереж. Сучасний етап проєктування, побудови, розвитку та модернізації Державної геодезичної мережі характеризується глибокою інтеграцією інноваційних рішень: виконання топографо-геодезичних робіт здійснюється із пріоритетним застосуванням постійно діючих супутникових радіонавігаційних систем (ГНСС), передових методів цифрового та комп’ютерного моделювання, високоточних математичних розрахунків, сучасних геоінформаційних технологій у поєднанні з класичними геодезичними методами лінійно-кутових та нівелірних вимірювань. Це дозволяє досягти максимальної оперативності та нормативно визначеної точності просторових даних при забезпеченні потреб містобудування, землеустрою, кадастру та капітального будівництва.

Компонентна структура Державної геодезичної мережі України інтегрує в собі три взаємопов'язані функціональні підсистеми, пункти яких на місцевості за можливістю суміщуються або між ними встановлюється надійний геодезичний зв’язок: по-перше, це геодезична (планова) мережа, що виступає основою для поширення єдиної системи координат; по-друге, нівелірна (висотна) мережа, яка забезпечує передачу уніфікованої системи висот; по-третє, державна гравіметрична мережа, призначена для вимірювання параметрів гравітаційного поля Землі.

Головною складовою для горизонтальної прив'язки об'єктів є геодезична (планова) мережа, яка організаційно включає українську постійно діючу (перманентну) мережу спостережень глобальних навігаційних супутникових систем та класичні геодезичні побудови 1, 2 і 3 класів. Математичним підґрунтям для обчислення просторового положення пунктів цієї мережі є Державна геодезична референцна система координат УСК-2000. На її основі

формуються плоскі прямокутні координати, обчислені у триградусних зонах проекції Гаусса-Крюгера, що є обов'язковим технічним критерієм для ведення великомасштабного топографічного знімання.

Вертикальну координаційну основу формує нівелірна (висотна) мережа, яка диференціюється на класи нівелювання I, II, III і IV класів. У практиці інженерно-геодезичних вишукувань відбулися докорінні трансформаційні зміни: якщо раніше висотна основа традиційно спиралася на Балтійську систему висот 1977 року, то починаючи з 01 січня 2026 року в Україні законодавчо впроваджено обов'язкове виконання висотних геодезичних робіт та обчислення висот пунктів в Європейській вертикальній референцній системі (EVRS). Цей перехід забезпечує повну уніфікацію національних геопросторових даних із загальноєвропейськими стандартами та вимагає суворого врахування нових редукційних поправок при опрацюванні результатів нівелювання.

Третім невід'ємним компонентом виступає гравіметрична мережа, яка забезпечує визначення фундаментальних параметрів поля сили тяжіння. Дані гравіметричних вимірів мають критичне значення для сучасного геодезичного виробництва, оскільки вони слугують математичною основою для точного моделювання поверхонь геоїда та квазігеоїда на території України. Без залучення точної моделі квазігеоїда є неможливим коректне переведення еліпсоїдальних висот, отриманих за допомогою сучасних супутникових ГНСС-спостережень, у нормальні висоти нововведеної європейської системи EVRS, що безпосередньо впливає на точність висотного забезпечення топографічних планів великих масштабів.

На місцевості Державна геодезична мережа матеріалізується та суворо закріплюється за допомогою системи спеціальних інженерних споруд: геодезичних, нівелірних і гравіметричних пунктів, а також постійно діючих станцій супутникових спостережень. Носіями гранично точних координат і висот є безпосередньо їхні фізичні центри та репери, які обладнуються надійними підземними монолітами для забезпечення довгострокової

стабільності просторового положення у часі. До складу кожного такого пункту також входять обов'язкові елементи зовнішнього оформлення, зокрема: охоронні стовпи, канави та насипи, що візуалізують знак на місцевості та захищають інженерну споруду від випадкового антропогенного чи природного руйнування.

Повний технологічний цикл створення, модернізації та функціонування пунктів геодезичної основи є суворо регламентованим і складається з декількох послідовних етапів: технічного проектування та математичного обґрунтування геометрії побудов, рекогносцирування місцевості, закладки й будівництва геодезичних знаків і центрів, виконання безпосередніх інструментальних вимірювань, камеральної обробки та математичного вирівнювання результатів на ЕОМ, складання підсумкових каталогів координат і висот із подальшим веденням банку геопросторових даних. Особливе місце у цьому процесі посідає етап рекогносцирування, під час якого фахівці здійснюють детальне обстеження району майбутніх робіт для остаточного вибору точок розміщення пунктів. При цьому обов’язково аналізуються всі раніше виконані топографо-геодезичні роботи на цій території, а також комплексно враховуються локальні фізико-географічні, гідрогеологічні та кліматичні умови, що гарантує тривале збереження знаків і забезпечує максимальну зручність їх подальшого інструментального використання при зйомках.

Для збереження актуальності та експлуатаційної придатності планово-висотної основи здійснюється постійний моніторинг її фізичного стану. Відповідно до нормативних вимог, планове обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі має проводитися систематично, але не рідше ніж один раз на 10 років. Проте в особливих регіонах із нестабільним геодинамічним або техногенним режимом цей процес суттєво прискорюється: у сейсмічно активних зонах, а також на територіях інтенсивного видобутку корисних копалин чи ведення підземних гірничих робіт, геометричні параметри мережі підлягають позачерговому відновленню. У таких випадках

моніторинг і переобчислення просторового положення пунктів виконуються в оперативному режимі з обов’язковим залученням актуальних даних маркшейдерського забезпечення робіт, що дозволяє вчасно фіксувати деформації земної поверхні та підтримувати нормативно визначену точність вихідної геодезичної основи.

Розрахункова щільність пунктів Державної геодезичної мережі та створеної на її основі знімальної основи має критичне значення для забезпечення належної якості топографо-геодезичного виробництва. Згідно з чинними нормативними вимогами, щільність геодезичної основи більше не прив'язується до застарілих дрібномасштабних картографічних одиниць, а встановлюється за гнучким диференційованим принципом залежно від двох визначальних факторів: характеру топографічної поверхні (ступеня забудованості території) та безпосереднього масштабу запланованого знімання. Такий підхід дозволяє суттєво оптимізувати трудовитрати на виконання польових робіт, зберігаючи при цьому нормативно визначену геометричну точність просторових даних.

Для виконання інженерно-геодезичних вишукувань діючі нормативи передбачають розгортання геодезичної основи за чітким диференційованим принципом: незалежно від конкретного масштабу знімання (від 1:5000 до 1:500), щільність пунктів геодезичних мереж спеціального призначення у незабудованій місцевості має становити не менше 1 пункту на 1 квадратний кілометр, а на територіях із високим антропогенним навантаженням та у межах населених пунктів - не менше 2 пунктів на 1 квадратний кілометр. Водночас принципово інші, значно жорсткіші критерії встановлюються для територій з високим антропогенним навантаженням: для забезпечення інженерно-геодезичних, містобудівних та кадастрових зйомок у межах населених пунктів, міських поселень, а також на складних промислових майданчиках щільність геодезичної основи має становити не менше 2 пунктів на 1 квадратний кілометр. Забезпечення такої високої концентрації вихідних точок досягається шляхом додаткового проектування та розгортання

геодезичних мереж спеціального призначення та знімальних мереж, що гарантує надійне координатно-висотне прив'язування кожного елемента забудови чи інженерної інфраструктури безпосередньо від пунктів Державної геодезичної мережі.

У практичній геодезичній діяльності досить часто виникають ситуації, коли базової щільності пунктів Державної геодезичної мережі виявляється недостатньо для повного задоволення суворих вимог великомасштабного картографування, що є критично важливим для цілей містобудування, архітектурно-будівельного проектування, інженерних вишукувань, а також для точного ведення Державного земельного кадастру. У таких випадках чинне законодавство, передбачає посилення вихідної геодезичної основи шляхом проектування та розгортання додаткових геодезичних побудов: геодезичних мереж спеціального призначення, а також планових і висотних знімальних геодезичних мереж. Ці підсистеми послідовно інтегруються у загальну структуру координатно-висотного забезпечення, утворюючи єдиний технологічний комплекс із вихідними загальнодержавними пунктами.

Першим етапом посилення опорної геодезичної основи є створення геодезичних мереж спеціального призначення, які розгортаються на територіях з інтенсивним господарським розвитком або високим антропогенним навантаженням. Головним технічним критерієм під час їхнього математичного вирівнювання є дотримання високих нормативних вимог щодо локальної точності: середня квадратична похибка визначення планових координат геодезичних пунктів таких мереж у межах населених пунктів та промислових об'єктів не повинна перевищувати 0,05 метра. Такий суворий допуск дозволяє повністю нівелювати деформації геопросторових даних при розпланування міських кварталів, будівництві складних інженерних споруд та визначенні меж земельних ділянок.

Безпосереднім технічним інструментом для збору метричних даних про ситуацію та рельєф під час польових робіт виступають знімальні геодезичні мережі, що розвиваються безпосередньо від пунктів Державної геодезичної

мережі та геодезичних мереж спеціального призначення. До геометричних параметрів знімальної основи висуваються жорсткі вимоги, оскільки вони безпосередньо визначають точність підсумкової графічної чи цифрової продукції: середня квадратична похибка (СКП) просторового положення точок знімальної мережі в плані відносно вихідних пунктів Державної геодезичної мережі не повинна перевищувати 0,1 міліметра у масштабі створюваного топографічного плану**, тоді як гранична похибка за контрольними вимірами не повинна перевищувати подвоєного значення СКП (тобто 0,2 міліметра) Досягнення таких високих лінійних показників вимагає суворого дотримання кутових допусків при вимірюваннях, згідно з якими середня квадратична похибка вимірювання кутів у планових знімальних побудовах (зокрема, при прокладанні теодолітних або лінійно-кутових ходів) має становити до 10 кутових секунд. Це забезпечує надійну геометричну жорсткість знімальної мережі та унеможливлює накопичення систематичних похибок у процесі подальшого детального знімання об'єктів місцевості.

Сучасний етап розвитку геодезичного виробництва характеризується стрімкою автоматизацією та модернізацією польових процесів, що стало можливим завдяки широкому впровадженню супутникових технологій. Найбільш вагомим технологічним зрушенням у цьому напрямі є нормативно закріплена можливість застосування методів спостережень глобальних навігаційних супутникових систем у режимі реального часу (RTK) з використанням розгалужених мереж постійно діючих перманентних базових станцій. Відповідно до положень чинного законодавства використання цієї передової технології дозволяє кардинально переглянути класичні підходи до організації геодезичної основи безпосередньо на об'єкті робіт. Зокрема, чинні нормативні акти офіційно дозволяють виконавцям взагалі не створювати традиційну наземну знімальну геодезичну мережу та повністю відмовитися від трудомісткого процесу фізичного закріплення точок на місцевості шляхом закладки тимчасових знаків: дерев'яних кілків, металевих штирів чи труб.

Така технологічна оптимізація є правомірною за умови суворого дотримання чіткого геометричного критерію: абсолютна похибка визначення просторових координат точок (пунктів) знімальної основи відносно найближчих діючих базових станцій не повинна перевищувати 0,1 метра. Пряме виконання великомасштабного топографічного знімання безпосередньо від пунктів мережі перманентних супутникових станцій ГНСС забезпечує колосальний виробничий ефект: по-перше, повністю нівелюються фінансові витрати на придбання матеріалів та тривалий монтаж фізичних центрів знімальної мережі; по-друге, ліквідується необхідність виконання додаткових лінійно-кутових вимірювань і прокладання геодезичних ходів, які раніше супроводжувалися накопиченням похибок; по-третє, у кілька разів скорочуються загальні строки проведення польового етапу інженерно-геодезичних вишукувань. Це забезпечує значну економію коштів та часу на виробництві, підвищуючи рентабельність робіт без жодних компромісів щодо нормативно визначеної точності підсумкових геопросторових даних.

Завершальним і найбільш практично значущим етапом технологічного функціонування Державної геодезичної мережі є її безпосередня інтеграція у капітальне будівництво, де вона виступає надійним зв’язуючим містком між стадіями картографування, інженерного проєктування та фізичного зведення об'єктів. При переході від виконання топографічної зйомки до безпосереднього виконання розбивочних робіт на майданчику пункти Державної геодезичної мережі та створена на їхній основі високоточна геодезична основа слугують фундаментальними вихідними даними для побудови геодезичної розмічувальної мережі будівельного майданчика. Цей процес передбачає послідовне розгортання двох взаємопов'язаних систем: зовнішньої розмічувальної мережі будівлі або споруди, яка закріплює на місцевості головні, основні чи проміжні розбивочні осі та визначає загальні планово-висотні габарити об'єкта, а також внутрішньої розмічувальної мережі, що створюється безпосередньо на вихідних та монтажних горизонтах для забезпечення детального встановлення будівельних конструкцій.

Організація та розвиток таких локальних інженерних мереж підпорядковані суворому правилу ієрархічності: вихідні геодезичні пункти виступають єдиною математичною основою, що унеможливлює накопичення випадкових та систематичних похибок під час винесення проєкту в натуру. Подальший інструментальний контроль точності та виконавче знімання цих побудов на всіх етапах монтажного циклу мають суворо відповідати жорстким будівельним допускам: граничні похибки лінійних, кутових та висотних вимірювань регламентуються конкретними технологічними допусками на зведення конструктивних елементів та монтаж обладнання. Такий наскрізний геодезичний моніторинг дозволяє оперативно виявляти та усувати щонайменші відхилення від проектних значень, запобігаючи виникненню небезпечних деформацій будівельних конструкцій та гарантуючи довгострокову експлуатаційну надійність, стійкість і безпеку зведеного інженерного об'єкта.

Державна геодезична мережа виступає фундаментальною геометричною та координатно-висотною основою просторової інфраструктури України, яка забезпечує національну безпеку, обороноздатність та сталий розвиток економіки країни. Сучасний етап її модернізації фіксує глобальну цифрову трансформацію та інтеграцію України у європейський геопростір. Ключовим технологічним і правовим кроком у цьому напрямі став перехід на референцну систему координат УСК-2000 та законодавче впровадження Європейської вертикальної референцної системи (EVRS) з 1 січня 2026 року, що остаточно адаптує вітчизняні геодезичні стандарти до міжнародних вимог.

Нові гнучкі підходи до нормування щільності геодезичної основи та офіційне закріплення супутникових спостережень у режимі реального часу (RTK) дозволяють виконавцям відмовитися від рутинного фізичного закріплення тимчасових точок на місцевості. Це суттєво скорочує фінансові та часові витрати на виробництві без жодних компромісів щодо точності геометричних даних. Суворе дотримання нормативних середніх квадратичних похибок забезпечує бездоганну якість великомасштабного картографування,

що є критично важливим для містобудування та ведення Державного земельного кадастру.

Зрештою, створена планово-висотна основа слугує надійним зв'язком між етапами проєктування та капітального будівництва. Вона забезпечує наскрізний інженерно-геодезичний моніторинг від перших розбивочних осей до виконавчого знімання, гарантуючи експлуатаційну надійність, стійкість та безпеку зведених об'єктів на всіх етапах їхнього життєвого циклу [1-4].

1.2 Геодезична планова мережа

Відповідно до Закону України № 353-XIV «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», Державна геодезична мережа (ДГМ) має особливий правовий статус та є основою для виконання всіх видів топографічних, геодезичних і картографічних робіт на території країни. Законодавство чітко закріплює визначення цієї структури: державна геодезична мережа є мережею геодезичних пунктів, що забезпечує поширення координат на територію держави і є вихідною для створення інших геодезичних мереж. У загальнодержавному вимірі вона виконує функцію головної планово-висотної основи: вона забезпечує єдність і точність вимірювань, просторову інтеграцію геоінформаційних ресурсів та виконання зйомок у єдиній системі координат і висот. Створення, планомірний розвиток і підтримка в робочому стані державної геодезичної та висотної геодезичної мереж нормативно віднесені до категорії робіт загальнодержавного призначення, що підкреслює її фундаментальне значення для економічного розвитку, екологічного моніторингу та забезпечення обороноздатності України.

Важливим аспектом забезпечення наукової та термінологічної точності кваліфікаційної роботи є суворе дотримання законодавчо встановленого понятійного апарату. У практичній діяльності та деяких вітчизняних технічних матеріалах попередніх років іноді трапляється використання спрощеної або

розмовної абревіатури «ГМ» (геодезична мережа), проте в межах цього дослідження її застосування визнано технічно некоректним та науково необґрунтованим. Чинний Закон України чітко розмежовує загальне поняття геодезичної мережі як будь-якої сукупності геодезичних пунктів та безпосередньо Державної геодезичної мережі: різниця між ними полягає у юридичному статусі, вимогах до точності, методах побудови та масштабності просторового охоплення.

Сучасна структура та ієрархічна побудова Державної геодезичної мережі України регламентуються чіткими нормативними положеннями, що покликані забезпечити системну єдність, стабільність та необхідну щільність геодезичної основи на всій території держави.

Систематизація загальної структури планової мережі базується на комплексному поєднанні різних за точністю та призначенням елементів. Вихідною основою для всієї геодезичної системи є астрономо-геодезичні та супутникові пункти вищих порядків, які задають єдину геоцентричну систему координат. Наступні рівні виконують функцію послідовного згущення: мережа 1 класу забезпечує глобальну геодезичну цілісність країни, пункти 2 класу формують однорідну основу для регіональних досліджень, а Державна геодезична мережа 3 класу виступає безпосередньою базою для виконання топографічних знімань та інженерних вишукувань.

Проектування та розвиток цієї багатоступеневої системи підпорядковується суворим загальним принципам, що визначають взаємозв’язок між різними класами пунктів. Головне правило проектування вимагає, щоб координати пунктів нижчих класів обчислювалися виключно від пунктів вищих класів, що виключає деформацію загальної геодезичної мережі. При цьому щільність пунктів розраховується таким чином, щоб повністю задовольнити потреби картографування, кадастру та будівництва у конкретному регіоні. Нормативні положення визначають базові критерії для оптимізації мережі на місцевості, серед яких виділяють такі вимоги: рівномірність розташування геодезичних знаків на певній площі, забезпечення

максимальної стабільності та довговічності центрів пунктів, а також урахування фізико-географічних умов району робіт. Надійна ієрархічна структура та висока щільність пунктів дозволяють ефективно інтегрувати традиційні лінійно-кутові методи вимірювань із сучасними супутниковими технологіями, створюючи стійкий і точний координатно-часовий простір держави.

Розвиток Державної геодезичної мережі другого класу (ДГМ-2) на сучасному етапі підпорядковується жорстким техніко-технологічним вимогам та метрологічним допускам, що забезпечують її високу надійність як проміжної ланки координатної основи країни. Відповідно до положень чинного законодавства проектування та побудова пунктів ДГМ-2 здійснюється двома основними взаємодоповнюючими методами: супутниковим, що базується на спостереженнях глобальних навігаційних супутникових систем, та класичним лінійно-кутовим методом, який використовує високоточні електронні тахеометри та віддалеміри. Поєднання цих підходів дозволяє досягати максимальної геометричної стійкості мережі як у відкритій місцевості, так і в умовах щільної забудови чи складного рельєфу, де пряма видимість між супутниками або суміжними пунктами може бути частково обмежена.

При проектуванні геометрії мережі другого класу встановлюються чіткі просторові та точнісні обмеження, серед яких ключовими є такі показники: граничні геометричні параметри сторін мережі, ліміт кількості ліній у геодезичному ході та граничні значення випадкових помилок вимірювань. Цим нормативним документом детально визначено граничні геометричні параметри сторін: відстань між суміжними пунктами ДГМ-2 повинна становити від 5 до 12 км. Такий діаметр осередків є оптимальним для забезпечення рівномірного покриття територій та створює надійний плацдарм для подальшого згущення мережі пунктами нижчих класів. У разі застосування лінійно-кутових методів та прокладання геодезичних ходів полігонометрії встановлюється суворий ліміт кількості ліній у ході: загальна

кількість сторін між вихідними пунктами вищого класу не може перевищувати 6 сторін. Це обмеження спрямоване на упередження неконтрольованого накопичення кутових та лінійних похибок, яке зазвичай виникає при надмірному подовженні ходових ліній.

Головним метрологічним критерієм якості та фінальної точності побудови Державної геодезичної мережі другого класу є середня квадратична похибка (СКП) визначення планового положення пунктів ДГМ-2 відносно найближчих пунктів вищих класів, яка установлена на суворому рівні: вона має перебувати в межах від 0,04 до 0,05 м. Досягнення така точність вимагає застосування супутникових приймачів геодезичного класу з тривалими сесіями спостережень у статичному режимі, а також багаторазових кутових прийомів при лінійно-кутових вимірюваннях. Впровадження цих допусків дозволяє повністю виключити суттєві внутрішні деформації планової мережі та гарантує, що побудована інфраструктура відповідатиме найвищим критеріям геодезичного забезпечення картографічних, кадастрових та інженерно-будівельних робіт загальнодержавного і регіонального рівнів.

Для підвищення надійності та забезпечення безперешкодного використання пунктів Державної геодезичної мережі 2 та 3 класів (ДГМ-2 та ДГМ-3) нормативними документами передбачено обов’язкове закладання додаткових допоміжних точок, які мають офіційну назву «орієнтирні пункти». Використання будь-яких інших термінів, зокрема розмовного «пункти-супутники», є неприпустимим у технічній документації, оскільки це призводить до термінологічної плутанини із космічними навігаційними системами.

Основною вимогою до розміщення таких пунктів-орієнтирів є забезпечення прямої видимості між ними та основним геодезичним знаком, що дозволяє виконувати орієнтування приладів при проведенні вимірювань. При проектуванні розташування орієнтирних пунктів дотримуються встановлених обмежень щодо відстаней, які залежать від умов місцевості:

– на відкритих територіях відстань має перебувати в межах від 500 до

1000 метрів;

– у забудованих районах, де оптичні перешкоди значно обмежують простір, мінімально допустима відстань може бути скорочена до 250 метрів.

Метрологічні характеристики при встановленні орієнтирних пунктів підпорядковуються суворим допускам, що забезпечують необхідну точність геодезичної мережі. Зокрема, вимірювання ліній між основним знаком та орієнтирним пунктом повинно виконуватися з такою точністю, щоб середня квадратична похибка не перевищувала 0,05 метра (5 сантиметрів), а вимірювання кутових напрямків має здійснюватися з високою точністю, при якій середня квадратична похибка не повинна перевищувати 5 кутових секунд. Дотримання цих вимог гарантує стабільність геодезичної основи та можливість якісного виконання топографічних і кадастрових робіт навіть у складних умовах місцевості.

Державна геодезична мережа 3 класу (ДГМ-3) відіграє ключову роль у геодезичному забезпеченні території України, виступаючи основним засобом ущільнення геодезичної основи для виробничих цілей. Пункти ДГМ-3 створюються як логічне продовження вищих ланок державної мережі відповідно до встановлених Кабінетом Міністрів України вимог щодо побудови ДГМ, забезпечуючи щільність основи для подальшого виконання великомасштабних зйомок.

Технічне призначення ДГМ-3 безпосередньо пов’язане з виконанням топографічних знімань, оскільки ці пункти слугують вихідними точками для розгортання знімальних мереж під час створення топографічних планів у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. Така деталізація є базовою вимогою для проектування об’єктів архітектури, планування інженерної інфраструктури та управління територіальним розвитком. Крім того, ДГМ-3 є фундаментальною основою для виконання інженерно-геодезичних вишукувань, які передують будівництву будь-яких масштабних інженерних споруд. Надійність координат пунктів 3 класу дозволяє забезпечити необхідну точність при винесенні проєктів у натуру та здійсненні контролю за

геометричними параметрами будівельних конструкцій протягом усього життєвого циклу об'єкта.

Значну роль ДГМ-3 відіграє і у сфері земельно-кадастрових робіт: вона забезпечує ведення Державного земельного кадастру на високому метрологічному рівні. Використання пунктів 3 класу при визначенні меж земельних ділянок дозволяє мінімізувати похибки при їх кадастровій зйомці, що є критично важливим для усунення конфліктів щодо права власності та реєстрації нерухомого майна. Таким чином, ДГМ-3 інтегрує розрізнені геодезичні вимірювання в єдину державну систему координат, створюючи умови для безперебійного функціонування земельного ринку, ефективного державного управління земельними ресурсами та якісного виконання спеціальних виробничих завдань різної галузевої спрямованості.

Модернізація геодезичної інфраструктури України зумовлена об'єктивною необхідністю переходу від застарілих систем координат, що використовувалися в середині XX століття, до сучасної Державної геодезичної системи координат УСК-2000. Історично значна частина геодезичної основи була сформована в період 1954–1961 років за технічними регламентами, які на той час відповідали вимогам картографування, проте з розвитком супутникових технологій та підвищенням вимог до точності просторових даних стали недостатніми. Згідно з вимогами чинного законодавства процес інтеграції та перерахунку координат пунктів цих мереж є невід'ємною складовою створення цілісного геодезичного простору держави.

Процедура математичного переобчислення базується на застосуванні методів трансформації координат, що враховують як глобальні параметри зв’язку між референцними еліпсоїдами, так і локальні деформації, накопичені в мережах попередніх років унаслідок технічних обмежень вимірювальних інструментів того часу. Важливим етапом цієї модернізації стало структурне впорядкування класів мереж, зокрема процес злиття колишнього 4 класу із теперішнім 3 класом Державної геодезичної мережі. Таке рішення було прийнято для оптимізації щільності геодезичної основи: пункти, що раніше

належали до 4 класу, після проведення контрольних супутникових спостережень та аналізу їхньої стійкості, були інтегровані до ДГМ-3, що дозволило стандартизувати вимоги до точності та усунути дублювання в ієрархії геодезичних робіт.

Процес злиття та переобчислення дозволяє перетворити неоднорідний масив застарілих даних на єдину, метрологічно обґрунтовану інфраструктуру. Сучасна процедура передбачає проведення повторного обстеження пунктів, їх переоцінку за допомогою високоточних ГНСС-вимірювань та подальшу математичну обробку для включення в УСК-2000. Це забезпечує не лише сумісність координат пунктів, створених у різні часові періоди, а й високу точність кадастрових та інженерних робіт, виконуваних сьогодні. Таким чином, модернізація геодезичної мережі є не просто технічним перерахунком, а складним комплексним завданням з оновлення та гармонізації державної координатної основи, що забезпечує її відповідність сучасним міжнародним та національним стандартам геодезичного забезпечення.

Побудова планової мережі Державної геодезичної мережі 3 класу (ДГМ-3) регламентується суворими інженерно-геометричними допусками, дотримання яких є обов’язковим для забезпечення метрологічної однорідності геодезичної основи. Згідно чинного законодавства параметри ДГМ-3 оптимізовані для виконання великомасштабних знімань та кадастрових робіт, встановлюючи такі граничні характеристики: довжина ходу між пунктами вищих класів не повинна перевищувати 30 км, а довжина окремих сторін у мережі має перебувати в діапазоні від 2 до 10 км.

Математична точність вимірювань контролюється низкою встановлених допусків, що гарантують мінімізацію випадкових та систематичних помилок під час виконання польових робіт. Зокрема, для кутових вимірювань встановлено середня квадратична похибка (СКП) вимірювання кутів на рівні 1,5″. Якість тріангуляційних побудов оцінюється через нев’язку трикутника, яка не повинна перевищувати 6″. Для лінійно-кутових мереж або полігонометричних ходів загальна кутова нев’язка визначається за формулою:

$$f_\beta = 3 \cdot \sqrt{n}\,,$$

де n - кількість кутів у ході.

Важливим аспектом метрологічного контролю є оцінка точності лінійних вимірювань. Раніше у технічних матеріалах часто траплялися спотворені позначення, такі як m_s/S, які є наслідком технічних помилок розпізнавання. Відповідно до актуальних стандартів, для ДГМ-3 встановлено граничну відносну похибку вимірювання сторін, яка має бути не більшою ніж $m_s/S = 1{:}\,200\,000$.

Виконання цих допусків забезпечує надійну інтеграцію пунктів ДГМ-3 у державну систему координат УСК-2000. Кожен із наведених параметрів, від граничних довжин ходів до формул допустимих нев’язок, спрямований на створення жорсткого каркаса мережі, що виключає накопичення похибок при переході від вищих класів до мереж згущення. Це дозволяє геодезистам гарантувати високу якість виконавчих креслень та кадастрових планів, забезпечуючи юридичну достовірність просторових даних на всій території України.

Використання активних супутникових мереж під час визначення планового положення пунктів Державної геодезичної мережі 3 класу (ДГМ-3) є сучасним технологічним стандартом, що забезпечує високу точність та оперативність геодезичних робіт. Технологічний процес визначення координат та інтеграції пунктів ДГМ-3 у загальнодержавну систему базується на безпосередньому зв'язку з Українською постійно діючою (перманентною) мережею спостережень ГНСС (УПМ ГНСС).

Технологія визначення координат нових пунктів передбачає використання методів високоточного супутникового позиціонування, зокрема режимів RTK (Real-Time Kinematic) або статичних спостережень із використанням корекційної інформації від перманентних станцій. Процес інтеграції фізичного пункту на місцевості з мережею УПМ ГНСС проходить у кілька етапів:

– підготовчий етап, на якому здійснюється аналіз видимості сузір'їв

супутників на точці та перевірка зв'язку з найближчими базовими станціями через мобільні канали передачі даних;

– польовий етап, під час якого виконується встановлення геодезичного приймача на центрі пункту ДГМ-3 з подальшим вимірюванням часових серій або отриманням поправок у реальному часі для мінімізації впливу іоносферних та тропосферних затримок сигналу;

– етап камеральної обробки, де отримані сирі дані зіставляються з даними від мережі перманентних станцій для вирахування точних координат пункту в системі УСК-2000.

Фундаментальна роль УПМ ГНСС полягає у забезпеченні безперервного контролю параметрів системи координат та відстеженні рухів земної кори, що дозволяє усунути накопичені похибки під час побудови мережі. Інтеграція фізичних пунктів ДГМ-3 з цією мережею гарантує, що кожна нова точка є не просто локальним орієнтиром, а частиною єдиного метрологічного простору. Такий підхід мінімізує залежність від класичних методів тріангуляції та полігонометрії, що вимагали довготривалого перебування на пунктах, та дозволяє значно підвищити щільність мережі згущення, забезпечуючи високу якість геодезичних даних для будь-яких виробничих цілей.

Висотна складова пунктів Державної геодезичної мережі 3 класу (ДГМ-3) є критично важливою для забезпечення повної тривимірної характеристики геодезичної основи. Визначення висотної складової пунктів ДГМ-3 базується на поєднанні методів геометричного, тригонометричного або сучасного ГНСС-нівелювання у комплексі з моделями квазігеоїда та гравіметричними даними. При цьому чинне законодавство визначає параметри висотної точності цифрових моделей рельєфу та точок знімальної мережі під час безпосереднього топографічного знімання територій. Вимірювання здійснюються з використанням сучасних цифрових нівелірів, електронних тахеометрів та багаточастотних ГНСС-приймачів, метрологічні характеристики яких відповідають вимогам чинних стандартів. Тригонометричне нівелювання при цьому проводиться шляхом вимірювання

зенітних відстаней та похилих довжин сторін між пунктами із подальшим врахуванням поправок за кривизну Землі та рефракцію. Впровадження вказаних технологій та дотримання визначених похибок забезпечує формування якісної висотної основи, необхідної для виконання інженерно-геодезичних вишукувань, картографування територій та забезпечення потреб сучасного будівництва.

Пункти планової Державної геодезичної мережі (ДГМ-2 та ДГМ-3) є фундаментальною основою для виконання всіх інженерно-геодезичних робіт у будівництві. Згідно до положень чинного законодавства, ці пункти забезпечують перенесення проектних рішень з креслень безпосередньо на місцевість із заданою точністю. Безпосередній практичний зв’язок між ДГМ та об'єктами капітального будівництва реалізується через створення геодезичної розбивної основи (ГРО), яка є локальною геодезичною мережею, що безпосередньо спирається на державні пункти.

Прикладом прикладного значення ДГМ у будівництві є процес розгортання розмічувальних мереж на будівельних майданчиках, який включає наступні етапи:

– створення зовнішньої розбивної мережі, яка спирається на пункти ДГМ-2 та ДГМ-3, що дозволяє забезпечити єдину систему координат для всіх будівель та споруд у межах майданчика;

– розвиток внутрішньої геодезичної мережі (осі будівель, монтажні горизонти), яка деталізує просторове положення конструктивних елементів безпосередньо під час монтажних робіт;

– виконання виконавчого та контрольного знімання, що є завершальним етапом геодезичного забезпечення, під час якого здійснюється геодезична перевірка відповідності фактичного положення зведених конструкцій та прокладених комунікацій проектним даним.

Геодезичне забезпечення підземних та наземних комунікацій (водопостачання, газопостачання, кабельні лінії зв'язку та електропостачання) базується на точному визначенні планового положення точок траси відносно

пунктів ДГМ-3. Виконавче знімання таких мереж є невід'ємною частиною технічного нагляду, оскільки лише прив'язка до пунктів державної мережі гарантує, що дані про розташування підземних комунікацій будуть коректно внесені до міських або регіональних топографічних планів.

Таким чином, пункти ДГМ-2 та ДГМ-3 виступають не лише як орієнтири, а як метрологічний каркас, що дозволяє інтегрувати будь-який локальний будівельний проект у загальнодержавну систему просторових даних. Це мінімізує ризики при проектуванні, запобігає конфліктам з інженерними мережами під час виконання земляних робіт та забезпечує юридичну чистоту при здачі готових об'єктів в експлуатацію.

При оформленні графічних додатків та картосхем у дипломній роботі необхідно керуватися принципами забезпечення чіткості, професійної вивіреності даних та відповідності державним стандартам картографічного моделювання. Згідно до положень чинного законодавства картографічні матеріали, що відображають структуру Державної геодезичної мережі (ДГМ), мають не лише наочно демонструвати просторове розміщення пунктів, а й бути юридично та метрологічно коректними.

При візуалізації загальної графічної схеми планової структури ДГМ на території України слід дотримуватися таких вимог:

– умовні позначення: використання символів має відповідати чинним класифікаторам умовних знаків для топографічних планів та карт. Пункти різних класів (1, 2, 3) повинні бути чітко розрізнені за формою, розміром або кольором, що дозволяє користувачеві миттєво зчитувати ієрархію геодезичної мережі;

– картографічне моделювання: загальна схема повинна базуватися на актуальній державній геодезичній системі координат УСК-2000, забезпечуючи правильну передачу просторових відносин між пунктами ДГМ на всій території держави;

– якість підписів: усі підписи до графічних додатків, схем та малюнків мають бути виконані з дотриманням правил правопису, зокрема — повного

усунення технічних дефектів набору тексту, таких як злиття слів (наприклад, замість «плановоїдержавної» необхідно писати «планової державної», а замість «мережіУкраїни» - «мережі України»);

– візуалізація: оформлення картосхем має передбачати наявність обов'язкових елементів: назви, масштабу, легенди умовних позначень та посилання на офіційне джерело даних, що підтверджує достовірність відображеної інформації.

Дотримання цих правил гарантує, що графічна частина дипломної роботи буде сприйматися як цілісна та науково обґрунтована складова дослідження. Виправлення технічних помилок у підписах, зокрема коректне відокремлення слів, є показником високої культури оформлення технічної документації та запорукою відсутності двозначності при інтерпретації графічних даних.

Аналіз теоретичних та нормативно-правових засад побудови геодезичної інфраструктури дозволяє зробити висновок, що Державна геодезична мережа України є стратегічною основою для провадження всієї топографо-геодезичної, кадастрової та картографічної діяльності, яка забезпечує єдиний координатно-часовий простір та високу точність просторових даних на загальнодержавному рівні. Суворе дотримання законодавчо закріпленого понятійного апарату та повне вилучення застарілих чи спрощених термінів є обов'язковою умовою для ліквідації термінологічної двозначності й забезпечення безумовної відповідності технічної документації актуальним нормативним актам. Сучасна ієрархічна структура планової мережі, що включає Українську перманентну мережу спостережень ГНСС та послідовні мережі 1, 2 і 3 класів, реалізує фундаментальний інженерний принцип від загального до конкретного, мінімізуючи накопичення похибок та гарантуючи системну єдність вимірів.

Сучасний етап розвитку геодезичного простору держави характеризується масштабною модернізацією та гармонізацією з міжнародними стандартами, що виражається у переході до Державної

геодезичної референцної системи координат УСК-2000, інтеграції Європейської вертикальної референцної системи (EVRS) та оптимізації щільності мережі шляхом злиття застарілих класифікаційних рівнів. Поєднання передових методів супутникового ГНСС-позиціонування, супутникового й тригонометричного нівелювання з традиційними лінійно-кутовими вимірюваннями та жорсткими метрологічними допусками дозволяє досягати встановлених нормативних показників точності як для планового положення пунктів, так і для їхньої висотної складової в будь-яких фізико-географічних чи забудованих умовах місцевості.

Практична й виробнича цінність пунктів Державної геодезичної мережі другого та третього класів полягає у їхній ролі безпосереднього вихідного плацдарму для розгортання знімальних геодезичних мереж, ведення Державного земельного кадастру та створення геодезичної розбивної основи у будівництві. Завдяки забезпеченню прямої видимості за допомогою орієнтирних пунктів та використанню супутникових диференційних корекцій, пункти мережі виступають надійним метрологічним каркасом. Це дозволяє успішно інтегрувати результати великомасштабних топографічних зйомок, виконавчих знімань інженерних комунікацій та локальних будівельних проектів у цілісну державну систему геопросторових даних, мінімізуючи інженерні ризики та гарантуючи юридичну достовірність просторової інформації [5-6].

1.3 Нівелірна (висотна) мережа

Довгий час геодезичне виробництво, картографування та інженерні вишукування в Україні спиралися на історично сформовану вертикальну основу: використання Балтійської системи висот 1977 року (БС-77), вихідним пунктом якої традиційно слугував нуль Кронштадтського футштока. Попри тривалий період експлуатації у радянський та пострадянський періоди, дана система поступово втратила свій практичний та науковий потенціал через

низку технічних причин: застарілість вихідної астрономо-геодезичної основи, неврахування сучасних високоточних моделей квазігеоїда, а також накопичення значних похибок на великих відстанях від вихідного пункту. Окрім того, існування БС-77 створювало суттєві перешкоди при виконанні транскордонних інженерних проєктів, змушуючи виконавців застосовувати складні математичні редукції для узгодження геодезичних даних із сусідніми європейськими країнами.

Докорінне оновлення нормативного поля та модернізація висотної геодезичної основи відбулися до положень чинного законодавства, щодо обов'язкового переходу на Європейську вертикальну референцну систему (EVRS) з 01 січня 2026 року стали базовим критерієм для виконання всіх нових топографо-геодезичних робіт у державі. Впровадження цієї норми дозволило остаточно відмовитися від застарілих методологічних підходів кінця минулого століття та уніфікувати вимоги до створення топографічних планів і цифрових моделей місцевості.

Суть та фундаментальна цінність інтеграції висотної мережі України до європейського геодезичного простору полягає у досягненні повної сумісності національних геопросторових даних із міжнародними стандартами інфраструктури просторових даних. Завдяки переходу на систему EVRS створюються умови для ефективного поєднання традиційного геометричного нівелювання із новітніми супутниковими технологіями. Використання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) у поєднанні з узгодженою моделлю квазігеоїда дозволяє визначати нормальні висоти безпосередньо на робочих об'єктах із високою точністю, що значно прискорює процес згущення висотної основи та інтегрує геодезичну систему України у єдиний європейський цифровий простір.

Побудову Державної нівелірної мережі як головної висотної складової Державної геодезичної мережі (ДГМ) України виконано за суворим ієрархічним принципом від вищого класу до нижчого. Загальна структура мережі диференціюється на чотири послідовні класи, кожен з яких має чітко

визначені геометричні параметри, експлуатаційне призначення та математичні критерії точності.

Нівелірна мережа I класу характеризується найвищою точністю вимірювань і посідає особливе місце у структурі ДГМ. Основним її призначенням є вирішення важливих загальнодержавних завдань: моніторинг сучасних вертикальних рухів земної кори, вивчення глобальних геодинамічних процесів, сейсмічне районування територій, а також встановлення стабільної вихідної системи нормальних висот для всієї країни. З метою підтримання висотної основи в актуальному стані та своєчасної фіксації деформацій земної поверхні нормативно встановлено періодичність оновлення вимірів: у звичайних фізико-географічних районах повторне нівелювання ліній I класу виконується один раз на 15 років, тоді як у геодинамічно активних і сейсмонебезпечних регіонах цей термін скорочується до 10 років.

Наступним рівнем згущення є нівелірна мережа II класу, яка розгортається безпосередньо всередині полігонів вищого класу. Для побудови цієї мережі визначено такі геометричні параметри: формування замкнутих полігонів із загальним периметром, що не перевищує 300 км. Трасування ліній нівелювання I та II класів здійснюється за найбільш сприятливих топографічних і ґрунтових умов: уздовж залізниць, магістральних автомобільних доріг, а також русел великих річок. Особливістю проектування ліній вищих класів є їх обов'язковий зв'язок із уровенними постами на узбережжях морів та великих водойм, що дозволяє надійно контролювати зв'язок материкової системи висот із рівнями водного простору.

Для безпосереднього забезпечення господарської діяльності, капітального будівництва та великомасштабного картографування призначені нівелірні мережі III та IV класів. Вони слугують основою для топографічних знімань у великих масштабах від 1:5000 до 1:500 та вирішення інженерно-геодезичних завдань. Геометрія мереж III класу передбачає утворення систем ходів і полігонів із периметром від 60 до 150 км, проте для потреб розширених і великомасштабних знімань (масштабу 1:5000 і більше) допускається

зменшення периметра полігонів до 60 км. Своєю чергою, параметри мереж IV класу є найбільш локальними: гранична довжина окремого нівелірного ходу в такій мережі обмежена 50 км.

Основними критеріями оцінки якості польових вимірювань та урівнювання ліній є математичні критерії точності: допустимі висотні нев'язки ходів або замкнутих полігонів обчислюються за загальною базовою формулою $W_{\text{доп}} = C\sqrt{L}$, де L - довжина ходу або периметр полігону, км.

Коефіцієнт C жорстко регламентується окремо для кожного класу. Для ліній I класу випадкова похибка обмежена жорсткими рамками прецизійних вимірів, для ходів II класу гранична нев'язка становить $W_{\text{доп}} = \pm 5\sqrt{L}$ мм, для ліній III класу допуск розширюється до величини $W_{\text{доп}} = \pm 10\sqrt{L}$ мм, а для мереж IV класу максимальне розходження лімітується значенням $W_{\text{доп}} = \pm 20\sqrt{L}$ мм. Такі математичні допуски гарантують високу точність, надійність та єдність висотної геодезичної основи на всій території України.

Сучасна практична геодезія при побудові та розширенні висотної геодезичної основи спирається на комбінацію класичних і новітніх підходів, що дозволяє оптимізувати витрати часу та досягти нормативних параметрів точності.

Найбільш поширеним у практичній діяльності залишається традиційний метод: геометричне нівелювання (прилади, рейки, інварові стрічки, автоматизація процесу). Його реалізація базується на застосуванні прецизійних оптико-механічних або сучасних цифрових нівелірів, штрихових рейок, що оснащені інваровими стрічками для мінімізації температурних деформацій, а також впровадженні засобів автоматизації процесу зняття відліків та збереження результатів вимірювань. Завдяки сучасній автоматизованій фіксації даних суттєво знижується вплив особичих похибок виконавця, підвищується швидкість польових робіт і забезпечується висока точність визначення перевищень на станціях.

Поряд із класичними технологіями стрімкого розвитку набув сучасний метод: супутниковий метод (ГНСС-нівелювання), який відкриває широкі можливості для оперативного визначення просторового положення геодезичних пунктів. Застосування глобальних навігаційних супутникових систем дозволяє виконувати координатні визначення незалежно від умов видимості між точками та часу доби, що значно спрощує проектування мереж у складних фізико-географічних умовах чи на залісених територіях.

Організацію та технічні умови використання супутникових технологій чітко регламентують вимоги чинного законодавства до застосування ГНСС-спостережень для визначення висот у системи EVRS. Цей нормативно-правовий акт визначає жорсткі критерії щодо тривалості сесій спостережень, конфігурації супутникових сузір'їв, типів геодезичного обладнання та методів математичного урівнювання отриманих векторів. Головною умовою інтеграції супутникових даних є забезпечення нормативної точності визначення висот, яка повинна бути еквівалентною традиційним класам геометричного нівелювання.

Особливе науково-технічне значення у процесі впровадження супутникових технологій має роль моделей квазігеоїда для переходу від геодезичних (еліпсоїдальних) висот до нормальних висот EVRS. Оскільки супутникові приймачі реєструють суто геометричні (еліпсоїдальні) висоти відносно поверхні відлікового еліпсоїда, вони не відображають реальний розподіл потенціалу сили тяжіння. Для коректного трансформування цих даних у практичну систему висот застосовуються високоточні моделі квазігеоїда: просторові цифрові матриці редукційних поправок, які дозволяють врахувати відхилення реального геопотенціального поля та виконати точний перехід до нормальних висот європейського зразка, гарантуючи єдність вертикальної основи всієї держави.

Проектування та розгортання висотної геодезичної основи на урбанізованих територіях має свої специфічні особливості, що зумовлені високою щільністю забудови, наявністю розгалужених підземних інженерних

комунікацій та необхідністю забезпечення точних вишукувань для містобудівних потреб. Головним чинником, який визначає структуру та геометричні параметри проектованої мережі, є вимоги до щільності висотної основи для забезпечення великомасштабних знімань уніфікованого, розширеного чи спрощеного змісту: для кожного з цих типів топографічних робіт нормативно встановлюється відповідна кількість реперів на одиницю площі. Зокрема, під час виконання знімань розширеного змісту, які передбачають детальне відображення ландшафтних елементів, підземних мереж і фасадів будівель, щільність пунктів суттєво збільшується задля мінімізації похибок редукцій, тоді як для спрощеного змісту на незабудованих територіях допускається більш розріджене закладання тимчасових та постійних знаків.

Важливим кроком у напрямі оптимізації геодезичного виробництва та раціонального використання державних ресурсів стала спеціальна норма: обмеження для населених пунктів площею менше 20 кв. км полягає в тому, що на таких територіях дозволяється проектування мереж виключно IV класу. Впровадження цієї законодавчої норми скасовує необхідність тривалого, складного та економічно невиправданого прокладання ліній вищих класів у невеликих селищах та містечках. Геометричні допуски нівелювання IV класу є цілком достатніми для забезпечення нормативної точності топографічних планів масштабу 1:500 на обмеженій площі, а активне залучення супутникових технологій ГНСС-нівелювання за таких умов дозволяє оперативно створити надійну висотну основу, повністю узгоджену із європейськими стандартами.

Надійне функціонування, стабільність та геодезична єдність Державної нівелірної мережі у часі забезпечуються її обов’язковим довготривалим закріпленням на місцевості за допомогою спеціальних інженерних споруд. Класифікація та конструктивні особливості центрів згідно до чинного законодавства регламентують чіткий розподіл знаків за їхнім безпосереднім призначенням, тривалістю експлуатації та глибиною закладання залежно від

фізико-географічних, гідрогеологічних і геологічних умов району виконання робіт.

Найбільш стійкими та капітальними елементами висотної основи держави є вікові репери (типи 173, 174, 175), які закладаються у корінних скельних породах на значну глибину задля забезпечення стабільності висотної системи протягом століть, а також для вирішення глобальних наукових завдань, пов'язаних із моніторингом вертикальних рухів земної кори. На лініях нівелювання I та II класів обов'язково встановлюються фундаментальні репери (ґрунтовий тип 161, скельний тип 114), для яких визначено такі інтервали закладання: у звичайних фізико-географічних умовах відстань між ними становить у середньому 60 км, проте у сейсмоактивних зонах цей показник нормативно скорочується до 40 км задля детальнішого фіксування можливих деформацій земної поверхні. Для масового згущення висотної мережі та безпосереднього забезпечення топографічних знімань використовуються ґрунтові репери (тип 160) та стінні репери (тип 143). Стінні знаки монтуються переважно в цокольні частини капітальних кам'яних, цегляних або бетонних споруд, що гарантує їхню тривалу схоронність в умовах щільної міської забудови та промислових зон.

При проектуванні та прокладанні нівелірних ходів суворо враховуються нормативні правила щільності закладання знаків: постійні репери та марки встановлюються в середньому через кожні 5 км уздовж траси, а у фізико-географічно важкодоступних місцях, зокрема у високогірних, лісисто-болотистих чи пустельних районах, допускається збільшення цього інтервалу до 6 км. Кожен геодезичний пункт підлягає обов'язковому облаштуванню, що відображають жорсткі вимоги до оформлення: зовнішні знаки, канави, охоронні стовпи, акти передачі на схоронність землевласникам. Зовнішнє оформлення ґрунтових реперів передбачає створення розпізнавального кургану, відриття канави навколо знака та встановлення залізобетонного чи металевого охоронного стовпа із попереджувальною табличкою. Юридичним завершенням процесу побудови або оновлення пункту є обов'язкове складання

акта передачі геодезичного знака на схоронність землевласникам або землекористувачам, які з моменту підписання несуть персональну відповідальність за його пошкодження чи знищення.

Для ідентифікації пунктів Державної геодезичної мережі та їхнього чіткого розмежування від різноманітних місцевих чи відомчих геодезичних побудов нормативно визначено державне маркування: обов'язкова наявність літери «Д» та індивідуального номера для відрізнення від мереж спеціального призначення. Цей ідентифікатор разом із назвою профільного відомства відливається безпосередньо на чавунній марці або голівці репера, що дозволяє фахівцям однозначно визначити статус пункту та його належність до вищої державної висотної основи країни під час проведення польових обстежень, моніторингу чи інженерно-геодезичних вишукувань [7-9].

1.4 Постановка задачі

Сучасне капітальне будівництво та повоєнне відновлення інфраструктури м. Харкова вимагають виняткової точності на етапі розгортання розбивальних мереж. Фізико-географічні умови міста (рівнинно-горбистий розчленований рельєф, наявність розвинених яружно-balconies систем, де чверть території перебуває під загрозою змиву ґрунту) у поєднанні з техногенними та воєнними деструкціями підземних і наземних об'єктів унеможливлюють використання застарілих або неврівноважених геодезичних мереж.

Найбільш ефективним підходом є комбінування супутникових GNSS-технологій (для винесення базових пунктів) із класичними високоточними лінійно-кутовими вимірюваннями (електронними тахеометрами/теодолітами) для локального згущення мережі у вигляді геодезичних чотирикутників. Математична обробка таких мереж потребує застосування суворого методу найменших квадратів (МНК) для усунення геометричних нев'язок та

запобігання накопиченню системних помилок, що й зумовлює актуальність проєкту.

Об’єкт дослідження: процес створення планово-висотної геодезичної основи для будівництва.

Предмет дослідження: технологічні рішення з використанням GNSS-приймачів та оптико-електронних приладів, а також математичні методи корелатного врівноваження надлишкових геодезичних вимірів.

Мета проєкту: розробка оптимального проєкту планово-висотної геодезичної мережі для будівельного майданчика в м. Харків із суворим математичним обґрунтуванням її точності за допомогою методу найменших квадратів.

Екологічні та геоморфологічні трансформації безпосередньо впливають на точність і стабільність геодезичних мереж. Наявність розвинених яружно-балкових систем та ризики змиву ґрунту на схилах вимагають особливого підходу до вибору місць закладки тривалих геодезичних знаків. Водночас температурні аномалії міського середовища провокують виникнення локальних теплових потоків та оптичної рефракції, яка здатна спотворювати результати високоточних кутових і лінійних вимірів під час використання оптико-електронних приладів. Масові руйнування міської забудови, спричинені обстрілами, призвели до втрати значної частини пунктів старої міської геодезичної основи, що робить розгортання нових планово-висотних мереж першочерговим завданням для повоєнної відбудови інфраструктури.

З огляду на це, метою дипломного проєкту є розробка та математичне обґрунтування проєкту планово-висотної геодезичної мережі для будівельного майданчика в місті Харків. Об'єктом дослідження виступає безпосередній процес створення такої основи, а предметом - технологічні рішення із застосуванням супутникових GNSS-приймачів, сучасних тахеометрів та математичних методів суворого врівноваження надлишкових вимірів.

Деградація ландшафтів та мікрокліматичні коливання у Харкові більше не є виключно екологічною проблемою. Вони прямо впливають на фізичну

стабільність геодезичних центрів та оптичні властивості атмосфери під час вишукувань.

Для досягнення поставленої мети дослідження розподілено на взаємопов'язані аналітичні блоки, які охоплюють теоретичне обґрунтування методики та її практичне впровадження на конкретному об'єкті.

Перший блок роботи присвячений вибору оптимального інструментарію та розробці математичного апарату для опрацювання результатів. У цьому блоці обґрунтовується доцільність комбінованого підходу, де супутникові GNSS-технології використовуються для визначення координат вихідних пунктів високого класу точності, а електронні тахеометри або теодоліти застосовуються для локального згущення мережі у вигляді геодезичного чотирикутника.

Основна увага приділяється аналізу методу найменших квадратів, зокрема його корелатному варіанту із використанням множників Лагранжа. У роботі детально описується алгоритм складання умовних рівнянь, їхня лінеаризація за допомогою розкладу в ряд Тейлора та формування матричної моделі системи рівнянь поправок. Цей математичний підхід дозволяє суворо мінімізувати випадкові похибки вимірів, знайти вектори корелат і ввести необхідні кутові та лінійні поправки. Додатково формалізується методика попередньої оцінки якості польових даних за формулою Ферреро та розрахунку середньої квадратичної похибки вже врівноважених величин.

Другий блок є практичним втіленням розробленої методики з урахуванням специфіки обраного регіону. На основі аналізу геоморфологічних особливостей Харкова визначаються безпечні місця для закладки чотирьох пунктів геодезичного чотирикутника, де мінімізовано ризики зсувів та ерозії ґрунту. Для нівелювання впливу міського «острова тепла» та оптичної рефракції в проєкті закладається методика вимірювань повними прийомами у визначені часові інтервали.

У ході проєктування дві точки приймаються за вихідні базові основи, визначені супутниковим методом, а дві інші виступають точками згущення.

Використовуючи розроблений матричний алгоритм, виконується чисельне розв'язання нормальних рівнянь для конкретного масиву кутових вимірів. Після визначення вектора нев'язок та обчислення поправок проводиться оцінка відповідності отриманої точності жорстким вимогам чинних будівельних норм. Фінальним результатом проєкту є розрахунок плоских прямокутних координат і висот для нових пунктів та формування підсумкового каталогу, який стане надійною геодезичною основою для розпланування майбутніх споруд.

2 МЕТОДИЧНЕ ТА ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТВОРЕННЯ ПРОЄКТУ ПЛАНОВО-ВИСОТНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ

2.1 Методичне забезпечення формування планової геодезичної основи в будівництві

Проєктування опорної супутникової мережі для об'єкта дослідження розпочинається з детального аналізу наявної інфраструктури активних перманентних базових станцій (ПБС) Харківського регіону. На сьогодні в межах міста та прилеглих територій функціонує розгалужена інфраструктура супутникових референц-станцій, що належать різним операторам, зокрема загальнонаціональним мережам «System.NET» та «ЗакОСП», а також спеціалізованій станції Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Врахування технічних можливостей цих станцій дозволяє забезпечити безперервне отримання високоточних навігаційних даних як для роботи в режимі реального часу, так і для накопичення фазових спостережень з метою їхнього подальшого камерального опрацювання.

Обґрунтування вибору вихідних ПБС та розробка схеми їхнього геометричного рознесення виконується з урахуванням розташування об'єкта роботи та необхідності створення жорсткої просторової конструкції: для забезпечення мінімального впливу геометричного фактора (PDOP) обираються станції, які рівномірно оточують район виконання робіт. Створення базових ліній (векторів) між обраними референц-станціями та новими пунктами проєктується у вигляді замкнених геометричних фігур (трикутників або полігонів), що гарантує наявність надлишкових вимірів. Такий підхід дозволяє виконати якісний контроль якості замикання фігур та забезпечити високу точність визначення просторових векторів під час математичного врівноваження мережі.

Важливою умовою супутникового знімання є сувора прив'язка локальної супутникової мережі до пунктів Державної геодезичної мережі (ДГМ) України, що закріплені на місцевості фізичними центрами. Згідно з вимогами чинного законодавства та нормативних документів, референц-станції та локальні мережі згущення не можуть існувати ізольовано: для надійного контролю та коректного обчислення параметрів трансформації координат обов'язковим є забезпечення зв'язку не менше ніж з 3–4 пунктами ДГМ вищого класу. Спільне врівноваження супутникових векторів разом із геодезичними даними цих пунктів дозволяє проконтролювати стабільність вихідної основи, виявити можливі локальні зсуви земної кори або деформації міської геодезичної мережі, а також виконати безпомилковий перехід до Державної геодезичної системи координат УСК-2000 або затвердженої місцевої системи координат міста Харкова.

Незважаючи на високу ефективність супутникових методів, їх використання у щільній міській забудові стикається з суттєвими технологічними обмеженнями. Характерною рисою центральних та нових житлових районів міста Харкова є наявність так званих «міських каньйонів»: вулиць, що з обох боків обмежені висотними багатоповерховими будівлями, капітальними спорудами та елементами інфраструктури. У таких умовах кут відкритого небозводу є критично малим, що значно звужує сектор огляду для геодезичних приймачів і обмежує кількість супутників, які можуть одночасно перебувати в зоні прямої видимості антени, викликаючи серйозні геометричні спотворення просторової засічки.

До основних фізичних факторів перешкод, що виникають під час супутникових спостережень у забудованому середовищі, належить безпосереднє екранування радіосигналів: висотні споруди повністю або частково блокують проходження сигналів GNSS від супутників, які перебувають на низьких кутах піднесення. Це явище призводить до різкого зменшення кількості доступних для відстеження космічних апаратів і суттєвого погіршення геометричного фактора просторового розташування

супутників (PDOP). Коли значення індексу PDOP через малу кількість супутників або їхнє лінійне розташування перевищує допустимі норми, похибка визначення координат зростає експоненціально, роблячи супутникові вимірювання непридатними для високоточних робіт.

Іншим критичним фактором є ефект багатошляховості (multipath), який суттєво спотворює результати вимірів: радіосигнали відбиваються від стін будівель, особливо тих, що мають сучасні скляні, дзеркальні чи металеві фасадні конструкції. Внаслідок цього антена приймача фіксує не лише прямий сигнал, а й серію відбитих імпульсів, що викликає непередбачуваний зсув фази тривалого коду, призводить до «відскоків» координат і унеможливлює отримання стабільного фіксованого розв'язку (fixed solution) у режимі реального часу.

Усі ці фактори обумовлюють необхідність застосування класичних методів геодезії: прокладання полігонометричних ходів 4 класу, а також ходів 1 та 2 розрядів стає єдиним надійним технічним рішенням для розвитку планової основи всередині «міських каньйонів». Використання високоточних електронних тахеометрів дозволяє виконувати лінійно-кутові вимірювання безпосередньо на рівні землі, повністю нівелюючи описані недоліки супутникових технологій у зонах екранування та забезпечуючи стабільну точність планової геодезичної основи.

Аналіз сучасних загрозових факторів у прикордонному мегаполісі, яким є місто Харків, вимагає особливого підходу до проєктування планової основи. В умовах тривалого воєнного стану геодезичні роботи більше не можуть спиратися виключно на класичні супутникові методи через постійну дію чинників, здатних повністю дезорганізувати або спотворити просторові виміри. Головним деструктивним фактором у міському середовищі є активне функціонування комплексів радіоелектронної боротьби (РЕБ), що розгорнуті для захисту об'єктів критичної інфраструктури. Наслідком їхньої роботи стає повне або часткове придушення основних робочих частот навігаційних супутникових систем, зокрема: цивільних та військових сигналів у діапазонах

L1, L2 та L5. Таке штучне зашумлення радіоефіру викликає різке зниження відношення сигнал/шум (SNR) на антенах геодезичних приймачів, через що апаратура втрачає здатність стійко відстежувати супутники, зриває фазові виміри, а виконання робіт у режимах кінематики (RTK) чи швидкої статики стає технічно неможливим.

Окрім прямого блокування сигналів, значно більшу приховану загрозу для точності планової геодезичної основи становить супутниковий спуфінг (spoofing). Суть цього явища полягає у навмисній імітації та підміні легітимних сигналів супутників космічного сегмента фальшивими радіосигналами більшої потужності, які транслюються наземними або повітряними передавачами. Підступність спуфінгу полягає в тому, що геодезичний приймач може безперешкодно зафіксувати супутники, виконати ініціалізацію та видати фіксований розв’язок, проте обчислені координати пунктів виявляться помилковими: вони міститимуть приховані систематичні зміщення, які залежно від налаштувань засобів перешкод можуть становити від кількох метрів до десятків кілометрів. За таких умов виникає критичний ризик геометричної деформації всієї локальної мережі, оскільки виявити факт підміни безпосередньо під час польових спостережень без додаткового контролю вкрай складно.

Наявність цих воєнно-технологічних ризиків зумовлює необхідність застосування гібридного підходу, що передбачає інтеграцію супутникових GNSS-технологій із класичними лінійно-кутовими вимірюваннями електронними тахеометрами. Оскільки тахеометри працюють в автономному оптико-електронному режимі, вони є абсолютно імунними до будь-яких засобів РЕБ чи супутникового спуфінгу. У межах цієї гібридної схеми супутникові спостереження методом тривалої статики використовуються лише на відкритих базових точках (наприклад, на дахах висотних капітальних споруд або заміських пунктах ДГМ), де є можливість накопичити надлишковий масив даних для математичного відсікання хибних сигналів. Надалі вся внутрішня робоча мережа у зонах РЕБ-активності та щільної

забудови розвивається за допомогою тахеометричних ходів полігонометрії 4 класу, 1 та 2 розрядів. Спільне математичне врівноваження цих різнорідних даних за методом найменших квадратів дозволяє компенсувати недоліки кожного з методів, гарантуючи кінцеву надійність та нормативну точність побудови планової геодезичної основи міста [10-14].

2.2 Методичне забезпечення формування висотної геодезичної основи в будівництві

Створення надійної та високоточної висотної геодезичної основи є базовим етапом інженерно-геодезичного забезпечення будь-якого будівельного процесу. Проєктування такої мережі вимагає детального аналізу параметрів майбутнього об'єкта, оскільки надлишкова точність призводить до невиправданих економічних і часових витрат, а недостатня - створює ризики аварійних ситуацій та порушень геометричних параметрів споруди.

Відповідно до чинного законодавства, усі геодезичні побудови жорстко диференціюються залежно від категорій відповідальності будівель. Державні будівельні норми передбачають поділ об'єктів на три класи наслідків: сс1 (незначні наслідки), сс2 (середні наслідки) та сс3 (значні наслідки). Таке розділення дозволяє гнучко підходити до нормування точності вимірювань, враховуючи поверховість, конструктивну складність, технологічне призначення та потенційні ризики для людей і навколишнього середовища у разі деформацій.

Вибір класу висотної основи безпосередньо залежить від встановлених граничних похибок монтажу та розбивки. Для об'єктів класу сс3, до яких належать висотні будівлі (понад 15 поверхів або висотою більше як 73,5 м), великі промислові комплекси та споруди з унікальними прогонами, технічно доцільним є проєктування висотної геодезичної мережі за програмою іі або ііі класу нівелювання. Натомість для будівництва об'єктів класу сс2, що охоплює більшість житлових та громадських будівель стандартної поверховості,

достатньою є точність ходів iv класу нівелювання. Для малоповерхової забудови класу cc1 допускається застосування спрощених методів геометричного або точного тригонометричного нівелювання.

Граничні значення середніх квадратичних похибок (СКП) визначення висот для різних конструктивних елементів коливаються у чітко визначених межах: для найбільш відповідальних споруд класу cc3 похибка передачі позначок на монтажні горизонти не повинна перевищувати 1–2 мм, для об'єктів класу cc2 цей допуск розширюється до 3 мм, а для класу cc1 може досягати 4–5 мм. Розрахунок точності проєктуємої мережі виконується з таким розрахунком, щоб похибка вихідної висотної основи становила не більше ніж 30 відсотків від зазначених технологічних допусків будівельно-монтажних робіт.

Наступним етапом є безпосереднє проєктування схеми висотної мережі будівельного майданчика. Будь-яка локальна висотна мережа не може існувати ізольовано, тому обов'язковою умовою є її прив'язка до вихідних пунктів Державної геодезичної мережі (ДГМ). Це забезпечує єдність висотної системи (УСК-2000 або Балтійської системи висот) та дозволяє контролювати стабільність геодезичної основи міста.

Саме розміщення робочих реперів на території майданчика підпорядковується суворим геомеханічним правилам: їх закладають поза зоною динамічного впливу будівельних процесів, ліній руху важкого транспорту та поза межами призми обрушення ґрунту навколо майбутнього котловану. Також враховується фактор можливих осідань земної поверхні під вагою новозведеної будівлі, тому радіус безпечного віддалення реперів розраховується відповідно до гідрогеологічних умов ділянки. Оптимальним є поєднання стінних реперів, закріплених на фундаментах вже сталих сусідніх будівель, та ґрунтових реперів, закладених нижче глибини промерзання ґрунту, що гарантує збереження висотної основи незмінною протягом усього періоду будівництва та подальшого моніторингу деформацій.

Геометричне нівелювання залишається найбільш надійним, точним і класичним методом побудови висотної геодезичної основи на будівельному майданчику. Вибір геометричної конфігурації висотної мережі залежить від щільності забудови, контурів об'єкта та розташування вихідних пунктів Державної геодезичної мережі. При проєктуванні розрізняють кілька основних схем прокладання нівелірних ходів: замкнуті полігони, системи ходів з вузловими точками та поодинокі ходи, що спираються на два вихідні репери.

Найбільш жорсткою та геометрично надійною конструкцією є саме система ходів з вузловими точками, оскільки вона забезпечує додатковий надлишковий контроль вимірювань і дозволяє локалізувати похибки усередині окремих полігонів. Замкнені полігони застосовують за умов, коли вихідна основа представлена обмеженою кількістю пунктів, або коли необхідно створити замкнутий висотний контур навколо безпосередньої плями будівництва для забезпечення монтажних робіт. Поодинокі (розімкнуті) ходи між двома надійними стінними або ґрунтовими реперами державної мережі є доцільними для лінійно-протяжних об'єктів або як сполучні ланки між окремими локальними вузлами будівельного майданчика. Проєктна довжина таких ходів та кількість станцій у них жорстко обмежуються нормативними вимогами для забезпечення заданого класу точності.

Організація вимірювань на кожній окремій станції вимагає суворого дотримання послідовності дій, яка дещо відрізняється залежно від типу використовуваного приладу. При застосуванні класичних оптичних нівелірів виконавець здійснює ретельне приведення приладу у робоче положення за допомогою круглого рівня, а перед кожним відліком за наявності елеваційного гвинта суміщає краї бульбашки циліндричного рівня або покладається на роботу автоматичного компенсатора. Відліки беруться по двосторонніх (чорній та червоній) рейках за тринитковим методом: спочатку виконується візування на задню рейку, потім на передню рейку, після чого для контролю зсуву приладу послідовність вимірювань повторюється у зворотному напрямку або змінюється висота інструменту.

Сучасне виробництво частіше передбачає використання цифрових (оптико-електронних) нівелірів, які повністю автоматизують процес зчитування інформації за допомогою вбудованої ПЗЗ-матриці та спеціальних штрих-кодових рейок. Робота на станції з цифровим приладом мінімізує суб'єктивну похибку спостерігача (похибку округлення «на око»), автоматично контролює коливання приладу та обчислює перевищення після кількох циклів вимірювань. Проте використання такої автоматики вимагає належного освітлення штрих-коду та захисту від теплових потоків повітря, що можуть викривити цифрове зображення рейки.

Ключовою умовою збереження високої точності геометричного нівелювання на станції є дотримання рівності відстаней від нівеліра до задньої та передньої рейок. Контроль нерівності пліч нівелювання дозволяє практично повністю нівелювати негативний вплив кількох систематичних факторів: непаралельності візирної осі зорової труби та осі циліндричного рівня (кута i приладу), кривизни земної поверхні, а також вертикальної атмосферної рефракції. Відповідно до вимог нормативних документів, для II класу нівелювання нерівність пліч на станції не повинна перевищувати 1 м, а накопичення нерівності по всьому ходу - 2 м, при цьому гранична довжина візирного променя обмежується 50 м. Для III класу ці допуски становлять відповідно 2 метри на станції та 5 метрів на хід із максимальною довжиною плеча до 75 метрів. При виконанні робіт за програмою IV класу, що найчастіше використовується безпосередньо на будівельних майданчиках, вимоги стають менш суворими: різниця відстаней до рейок на станції допускається до 5 метрів, накопичена різниця по ходу - до 10 м, а максимальна відстань від приладу до рейки може досягати 100 м за умов сприятливої погоди та чіткої видимості.

Критерієм якості виконаних польових вимірювань та підставою для подальшого математичного зрівнювання всієї мережі є величина отриманої висотної нев'язки, яка обов'язково порівнюється з її гранично допустимим значенням. Обчислення допустимої нев'язки ходу або замкненого полігону

виконується за математичними формулами, що враховують або загальну довжину ліній, або сумарну кількість станцій. Якщо довжина ходу вимірюється в кілометрах, застосовується класична формула виду $\Sigma h_{\text{доп}} = C\sqrt{L}$, де коефіцієнт C жорстко регламентується обраним класом точності: для II класу він становить 5 мм, для III класу - 10 мм, а для IV класу - 20 мм.

У випадках, коли нівелювання виконується на відносно коротких відстанях, але з великою кількістю встановлень приладу (що є типовим для умов обмеженого простору будівельного майданчика, глибоких котлованів або значних ухилів рельєфу), формулу розрахунку трансформують залежно від кількості станцій n. У такому разі гранична нев'язка визначається виразом $\Sigma h_{\text{доп}} = C\sqrt{n}$, де для III класу коефіцієнт C дорівнює 3 мм, а для IV класу - 5 мм.

Якщо фактична нев'язка замикання ходу перевищує розрахований нормативний допуск, результати виконаного нівелювання анулюються, а всі польові роботи на даній ділянці підлягають повному повторному виконанню.

Застосування тригонометричного нівелювання за допомогою сучасних електронних тахеометрів є високоефективною альтернативою традиційному геометричному нівелюванню, особливо в умовах інтенсивного ведення будівельно-монтажних робіт та складного рельєфу. Геометричне нівелювання суттєво втрачає свою продуктивність при значних ухилах місцевості, оскільки вимагає встановлення великої кількості проміжних станцій та значного укорочення пліч візування.

У таких випадках тригонометричний метод стає незамінним інструментом, що дозволяє виконувати точні висотні вимірювання на значних відстанях та при великих кутах нахилу візирного променя. Головними інженерними факторами, які обґрунтовують доцільність використання цього методу на будівельному майданчику, є такі умови: наявність складного або сильно пересіченого природного рельєфу ділянки, необхідність точної та оперативної передачі висотних позначок на дно глибоких котлованів без

прокладання багатостанційних ходів, а також потреба передачі висот на монтажні горизонти висотних будівель, де класичні методи є технічно неможливими або малоефективними через обмеженість простору.

Методологія виконання тригонометричного нівелювання електронними тахеометрами передбачає використання різних схем вимірювань залежно від геометрії об'єкта та умов видимості. Традиційні схеми нівелювання «вперед» та «назад» застосовуються переважно при прокладанні лінійних висотних ходів, проте в умовах реального будівництва найбільшу популярність здобув метод зсередини, який також відомий у практиці як метод «чистої станції» або висотної зворотної засічки.

При використанні цієї методики електронний тахеометр встановлюється у довільному місці, яке є найбільш безпечним та зручним для огляду конструкцій, а висота самого інструменту визначається шляхом зворотного візування на кілька опорних реперів з відомими висотами. Такий підхід дозволяє повністю уникнути похибок, пов'язаних із безпосереднім центруванням приладу над точкою, і значно прискорює виконання розбивочних робіт. Для досягнення найвищої точності та максимальної компенсації впливу зовнішнього середовища застосовують двостороннє одночасне нівелювання, коли вимірювання зенітних відстаней виконуються синхронно двома приладами на протилежних кінцях лінії, що дозволяє практично повністю усунути вплив вертикальної рефракції повітряного шару.

Особливу увагу при впровадженні тригонометричного нівелювання на сучасному етапі слід приділити нормативним вимогам. Цей нормативно-правовий акт встановлює жорстку норму щодо обов'язкового вимірювання висоти приладу i та висоти цілі або відбивача v з точністю до 1 мм, оскільки саме лінійні похибки визначення цих параметрів традиційно є головним джерелом помилок у кінцевому результаті геодезичних побудов.

Належне інструментальне забезпечення виконання цієї вимоги досягається завдяки впровадженню спеціальних технічних засобів: використання сертифікованих лазерних рулеток зі спеціальними насадками-

позиціонерами для вимірювання нахиленої відстані чітко до осі обертання зорової труби, застосування точних механічних вимірювальних шкал, які інтегруються безпосередньо у тримач трегера, а також обов'язкове використання відбивальних віх фіксованої довжини, що повністю ліквідує людський фактор та похибки округлення під час визначення висоти цілі.

Використання тригонометричного методу на будівельному майданчику вимагає суворого математичного обліку похибок, що виникають через вплив зовнішнього середовища. Розрахунок перевищень електронним тахеометром базується на редукційних обчисленнях, які автоматично враховують кривизну Землі та коефіцієнт атмосферної рефракції під час роботи на значних відстанях.

При виконанні робіт у літній період або поблизу працюючих будівельних машин, де приземні шари повітря сильно й нерівномірно прогріваються, коефіцієнт атмосферної рефракції може суттєво коливатися, тому його значення необхідно періодично контролювати та коригувати шляхом тестових вимірювань на лініях з відомими геометричними перевищеннями. Сучасне програмне забезпечення електронних тахеометрів дозволяє автоматично вводити метеорологічні поправки за температурою та тиском безпосередньо в полі, що гарантує отримання високої точності висотної основи будівельного майданчика.

Сучасний етап розвитку інженерно-геодезичних вишукувань та будівельного виробництва характеризується масштабним впровадженням глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). Використання супутникових методів, зокрема у режимах статичних спостережень (Static) та кінематики в реальному часі (RTK), дозволяє суттєво оптимізувати процес зйомки, розпланування та виконавчого контролю. Однак широке застосування цих технологій для безпосереднього висотного забезпечення будівництва стикається з фундаментальною математичною та геодезичною проблемою, яка полягає у принциповій різниці між геометричною поверхнею відліку супутникових систем та фізичною поверхнею Землі.

Принцип супутникового визначення висот базується на точному вимірюванні відстаней від супутників до антени приймача, що дозволяє обчислити просторові прямокутні координати в загальноземній системі, які згодом перераховуються у геодезичні координати на референц-еліпсоїді. Отримана в результаті таких обчислень геодезична (еліпсоїдальної) висота (h) є суто геометричною величиною, визначеною відносно математичної моделі земного еліпсоїда WGS-84 або GRS80. Оскільки еліпсоїд є лише ідеалізованою фігурою і не враховує нерівномірність розподілу мас усередині земної кори та відповідні коливання сили тяжіння, еліпсоїдальні висоти не мають фізичного змісту. Через це вони не можуть безпосередньо використовуватись у будівництві, де рух рідин, монтаж конструкцій та проєктування інженерних мереж підпорядковані законам гравітаційного поля Землі.

Саме тому виникає складна проблема переходу від еліпсоїдальних висот до фізичних, тобто нормальних висот H, які відраховуються від поверхні квазігеоїда. В інженерній практиці України обов'язковою умовою є побудова висотних мереж у Балтійській системі висот або у сучасній державній системі координат УСК-2000. Проблема редукції полягає у тому, що різниця між еліпсоїдальною та нормальною висотами на території України є величиною змінною і може коливатися в межах десятків метрів, а її градієнт обумовлений локальними аномаліями гравітаційного поля та особливостями рельєфу.

Чинне законодавство встановлює жорстку технічну вимогу щодо переходу від еліпсоїдальних висот до нормальних: обов'язковість застосування офіційної моделі квазігеоїда України для обчислення нормальних висот під час виконання топографо-геодезичних робіт. Математичний зв'язок між цими величинами описується класичною формулою: нормальна висота дорівнює різниці між еліпсоїдальною висотою та аномалією висоти ($H = h - \zeta$), де ζ є висотою квазігеоїда у конкретній точці будівельного майданчика. Використання цієї державної моделі дозволяє автоматизувати процес редукції супутникових даних безпосередньо у програмному забезпеченні сучасних ГНСС-приймачів.

Проте для умов конкретного будівельного майданчика, суто модельного переходу на основі глобальних чи загальнодержавних даних часто буває недостатньо через локальні спотворення вихідної геодезичної основи. Для мінімізації цих похибок та узгодження супутникових вимірювань із наявною розбивочною мережею застосовується методика локальної трансформації, яка у практичній інженерній геодезії частіше називається калібруванням або локалізацією висот.

Суть методу полягає у виконанні супутникових спостережень на групі локальних опорних реперів майданчика, які мають надійні та заздалегідь перевірені геометричним нівелюванням нормальні висоти. На основі отриманих подвійних даних програмний комплекс обчислює параметри зв'язку та будує локальну математичну поверхню, яка максимально точно описує поведінку квазігеоїда в межах конкретної плями забудови. Це дозволяє компенсувати залишкові похибки загальнодержавної моделі та забезпечити стабільне визначення висот у режимі реального часу.

Завершальним етапом впровадження супутникових методів є обов'язковий контроль точності отриманих результатів. Для цього виконується детальний порівняльний аналіз та оцінка точності супутникового нівелювання порівняно з традиційним геометричним нівелюванням ходів IV класу. Польовий контроль здійснюється шляхом виконання незалежних вимірювань супутниковими методами на пунктах, висоти яких раніше були визначені оптичними або цифровими нівелірами.

Статистичний аналіз отриманих розходжень дозволяє зробити висновок: за умови належного виконання висотного калібрування на достатній кількості реперів точність супутникового методу для об'єктів класів наслідків cc1 та cc2, проте для найбільш відповідальних конструкцій та монтажних горизонтів класу наслідків cc3 класичне геометричне нівелювання залишається основним і безальтернативним методом контролю геометричних параметрів [10-18].

2.3 Технічне забезпечення, прилади та метрологічний контроль

Для забезпечення високої точності, оперативності та надійності побудови планової геодезичної основи першочергове значення має раціональний вибір супутникового інструментарію. У сучасних умовах виконання топографо-геодезичних робіт на урбанізованих територіях використання застарілих одночастотних приймачів є неефективним через значний вплив завад, що зумовлені щільною міською забудовою, висотними спорудами та штучними перешкодами. З огляду на це, науково та практично обґрунтованим є застосування багаточастотної (L1/L2/L5) та багатосистемної апаратури.

Головна перевага таких приймачів порівняно з одночастотними аналогами полягає у здатності одночасно приймати та обробляти сигнали від різних глобальних навігаційних супутникових систем: американської GPS, європейської Galileo, китайської BeiDou та глобальної GLONASS. Це дозволяє значно розширити сузір'я доступних супутників у зонах з обмеженою видимістю небосхилу (так званих "міських канйонах") та мінімізувати ефект багатошляховості сигналу. Окрім того, комбінування частот L1, L2 та L5 дає змогу в автоматичному режимі обчислювати й усувати іоносферні та тропосферні затримки, які без належної редукції суттєво викривляють результати вимірювань.

Важливим технічним аспектом функціонування обраного комплексу обладнання є оптимізація процесу визначення просторових координат за рахунок підвищення швидкості розв'язання фазової невизначеності (ініціалізації). При використанні багаточастотних сигналів сучасні алгоритми обробки даних фіксують цілі числа циклів носійних коливань за лічені секунди, що безпосередньо впливає на надійність отримання якісних диференціальних розв'язків вектору-бази. Такий підхід гарантує стабільне формування фіксованих (fixed) розв'язків як під час зйомки у реальному часі (RTK), так і при використанні методу відкладеної камеральної пост-обробки

(Post-Processing). Це дозволяє повністю уникнути появи помилкових "плаваючих" (float) значень координат та забезпечує високу внутрішню збіжність супутникових векторів у запроєктованій локальній мережі.

Вибір зазначеного типу обладнання повністю задовольняє жорсткі технічні вимоги супутникових спостережень, що висуваються до геодезичних мереж відповідного класу чи розряду. Математичне моделювання та польові виміри проводяться з суворим контролем геометричних факторів розташування супутників на орбіті, що виражається через такі обов'язкові критерії: фактор зниження точності просторового положення PDOP не повинен перевищувати граничне значення 5, а мінімальна кількість супутників, що одночасно відстежуються приймачем і залучені до обчислення вектора, має становити не менше 4 одиниць. Дотримання цих параметрів разом із застосуванням необхідної кількості робочих частот забезпечує належну геометричну міцність супутникових конструкцій та дозволяє досягти середньої квадратичної похибки визначення пунктів у межах, установлених чинною нормативною базою України.

Для побудови надійної та високоточної геодезичної основи, зокрема під час прокладання ходів полігонометрії чи створення лінійно-кутових мереж на забудованих територіях, обґрунтованим є застосування сучасних прецизійних електронних тахеометрів. Вибір приладів із високою кутовою точністю вимірювання 1" або 2" зумовлений жорсткими вимогами до граничних похибок взаємного положення пунктів мережі, які фіксуються діючими інструкціями та державними будівельними нормами. Важливою перевагою таких тахеометрів є технічні характеристики їхнього далекомірного модуля: середня квадратична похибка вимірювання відстаней лінійного типу на стандартну призму не перевищує значення 1 мм + 1.5 ppm, що дозволяє звести до мінімуму випадкові інструментальні помилки. Окрім того, інтегрована можливість роботи в безвідбивачевому режимі суттєво розширює функціонал обладнання, забезпечуючи безпечне та оперативне визначення координат недоступних точок або елементів фасадів споруд на відстанях до кількох

сотень метрів. Сувора регламентація методики вимірів на станціях є ключовою умовою досягнення проєктної точності: кількість прийомів наведення на відбивач при двох положеннях круга (КЛ та КП) повинна становити щонайменше три-чотири повних прийоми, що дає змогу ефективно послабити вплив інструментальних ексцентриситетів, визначити місце зеніту та виключити систематичні похибки приладу.

Створення висотної складової геодезичної основи, що вимагає нівелювання високих класів точності, базується на використанні цифрових нівелірів та інварних рейок. Обґрунтування вибору цифрових (електронних) нівелірів полягає у мінімізації впливу людського чинника: такі прилади повністю виключають особисті похибки спостерігача, пов’язані з неправильним зчитуванням значень, суб'єктивним оцінюванням часток поділок або втомою зору під час тривалих польових робіт. Додатково цифрове обладнання забезпечує повну автоматизацію збору даних: результати вимірювань за допомогою ПЗЗ-матриці миттєво реєструються та зберігаються в енергонезалежній пам'яті для подальшого експорту в спеціалізовані обчислювальні комплекси. Для реалізації потенціалу точності електронного нівеліра обов'язковим є застосування прецизійних інварних рейок із штрих-кодовою дискретною шкалою: спеціальний інварний сплав має наднизький коефіцієнт теплового розширення, завдяки чому досягається мінімізація деформацій лінійних розмірів шкали під дією значних температурних коливань навколишнього середовища.

Невіддільною складовою технологічного процесу на кожній станції спостережень є допоміжне технічне забезпечення. Використання метеорологічних приладів: електронних термометрів та барометрів-анероїдів безпосередньо на станціях вимірювань є критично важливим для точного обчислення та автоматичного введення поправок за стан атмосфери. Оскільки фізичні параметри повітряного середовища динамічно змінюються, коливання температури й тиску суттєво впливають на показник заломлення світла: це викликає зміну швидкості поширення лазерного променя далекоміра та

провокує явища оптичної рефракції, що потребує оперативного математичного редукування результатів лінійних та висотних вимірів у режимі реального часу.

Забезпечення високої точності кінцевих результатів вимірювань та мінімізація інструментальних помилок вимагають обов'язкового виконання комплексу метрологічних процедур безпосередньо перед виходом на об'єкт. Калібрування та дослідження геодезичного обладнання розглядаються як базова вимога для недопущення систематичних похибок у польових матеріалах: без попереднього контролю геометричних та електронних параметрів інструментів існує високий ризик накопичення прихованих спотворень, які неможливо повністю усунути під час математичної обробки та врівноваження мереж у камеральних умовах.

Методика виконання та призначення основних повірок суворо регламентують послідовність дослідження кожного конструктивного елемента електронних тахеометрів та цифрових нівелірів. Першочергово проводиться дослідження постійної призми тахеометра (приладової поправки): цей процес передбачає визначення реальної різниці між механічним та електронним центром системи «тахеометр-відбивач» шляхом багаторазових порівняльних вимірів на спеціально обладнаному еталонному лінійному базисі.

Наступним кроком є повірка ексцентриситету алідади горизонтального круга: вона спрямована на виявлення та математичне врахування незбігу осі обертання алідади з геометричним центром лімба, оскільки ця похибка безпосередньо впливає на точність виміру кутів і вимагає оптимізації методики спостережень. Окрему увагу в ході підготовки приладу приділяють контролю стабільності вертикального круга, що реалізується через визначення місця зеніту (МЗ) або місця нуля (МО): методика його визначення базується на візуванні на чітку ціль за допомогою спостережень при двох положеннях круга (КЛ та КП), що дозволяє обчислити та програмно компенсувати кутове зміщення. Паралельно здійснюється калібрування та юстування рівнів: ця процедура включає приведення у відповідність геометричних осей циліндричних і круглих рівнів їхньому конструктивному положенню, а також

обов’язкове тестування внутрішніх електронних двовісних компенсаторів тахеометрів та цифрових нівелірів для забезпечення їхньої коректної роботи під час приведення приладів у робоче положення на станції.

Завершальним етапом інструментального аналізу є належне документування результатів метрологічного контролю відповідно до вимог чинного законодавства України. Встановлений порядок формування звітних матеріалів дослідження приладів передбачає обов'язкове отримання та систематизацію офіційних документів: свідоцтва про повірку геодезичного інструмента державного зразка та актів еталонування, які фіксують залишкові похибки і підтверджують придатність апаратури до виконання високоточних робіт. Ці матеріали мають юридичну силу, підтверджують технічну легітимність виконаних вимірів і додаються як обов'язковий технічний додаток до загального технічного звіту після завершення польового етапу побудови чи реконструкції геодезичної основи [14-17].

2.4 Типи геодезичних знаків та методика їх закладання в міських умовах

Вибір оптимальних способів закріплення пунктів планової геодезичної мережі є визначальним чинником її тривалого збереження та стабільності в умовах динамічного міського середовища. Сфера та умови застосування ґрунтових центрів у місті чітко обумовлені специфікою урбанізованого ландшафту. З огляду на інтенсивне техногенне навантаження, постійні розкопки та перекладання підземних комунікацій, закладання класичних ґрунтових знаків у щільній житловій чи промисловій забудові є недоцільним. Натомість обґрунтованою є практика їх розміщення в межах міських лісопарків, паркових зон, скверів, на територіях широких газонів або на майданчиках перспективної забудови, де на момент проектування та виконання робіт повністю відсутні капітальні будівлі. Таке просторове розташування дозволяє не лише забезпечити фізичну цілісність знаків, а й

створює сприятливі умови для виконання супутникових спостережень та кутових вимірів завдяки відсутності висотних перешкод.

Під час розгортання міських мереж базовим елементом виступає конструкція та закладання знака типу 160. Даний геодезичний центр має чітко визначене призначення: закріплення пунктів полігонометрії, трилатерації та тріангуляції 4 класу, а також 1 і 2 розрядів, які складають основу міської зйомки. Типова будова цього знака містить такі ключові конструктивні елементи: залізобетонний пілон (стовп) прямокутного або круглого перерізу, у верхню частину якого надійно вмонтовано металеву марку з насічкою для центрування приладів, та масивний бетонний якір-основа, що виливається безпосередньо у нижній частині знака для запобігання його виштовхуванню чи зміщенню.

Методика монтажу центру типу 160 вимагає суворого дотримання технологічної послідовності, де першочерговим етапом є точний розрахунок глибини закладання знака: вона повинна бути мінімум на 0.5 м нижчою за середню глибину промерзання ґрунту для відповідного географічного регіону, що захищає пункт від сезонних коливань шарів землі. Безпосередня технологія бетонування у котловані передбачає пошарове засипання та ретельне механічне ущільнення бетонної суміші навколо якоря та пілона, що гарантує монолітність зв'язку знака з материнським ґрунтом.

У місцях, де планова основа зазнає підвищених вібраційних чи механічних впливів, або коли виникає потреба у створенні довговічних вузлових точок, використовується конструкція посиленого знака типу У20П. Основне технічне призначення цієї модифікації полягає у такому: створення довготривалої планової основи 3 і 4 класів підвищеної стійкості, яка здатна зберігати незмінне положення протягом десятиліть. Головні конструктивні особливості знака типу У20П полягають у тому, що це потужна монолітна залізобетонна конструкція з багатошаровим антикорозійним захистом, яка додатково передбачає обов'язкове облаштування захисного підземного колодязя навколо головки знака.

Ефективний захист у міських умовах для знаків типу У20П реалізується шляхом монтажу спеціальних чавунних або міцних залізобетонних ковпаків (люків) з герметичними кришками, які встановлюються строго на рівні проїжджої частини, пішохідного тротуару чи газону: це дозволяє повністю убезпечити марку від руйнівного наїзду важкої будівельної чи комунальної техніки, мінімізує вплив атмосферних опадів та захищає пункт від вандалізму, забезпечуючи при цьому швидкий та безперешкодний доступ геодезиста до центру для виконання вимірювальних робіт.

У щільно забудованому та динамічному міському середовищі збереження вихідної геодезичної основи потребує використання конструктивних рішень, що мінімізують вплив антропогенних та техногенних чинників. Головні переваги стінного закріплення в урбанізованому середовищі полягають у такому: забезпечення максимального збереження геодезичного пункту порівняно з ґрунтовими аналогами в умовах постійної зміни міського ландшафту, проведення капітальних ремонтів дорожнього покриття, благоустрою територій та модернізації підземних інженерних комунікацій.

Ефективним технічним засобом для реалізації цього підходу є конструкція стінної марки типу 143, яка широко застосовується для фіксації точок міських планово-висотних мереж. Матеріал та будова знака розраховані на тривалу експлуатацію в агресивному атмосферному середовищі: це міцна металева штанга (хвостовик) з кулястою або плоскою голівкою, на лицьовій поверхні якої обов'язково передбачена наявність висіченого хреста чи спеціального отвору для фіксації візирної цілі під час кутових спостережень або шпильки рулетки під час виконання лінійних вимірювань.

Надійність стінного знака безпосередньо залежить від стабільності інженерної конструкції, в яку його монтують, тому методика вибору споруд для закладання знаків базується на жорстких технічних критеріях. Чинні критерії відбору будівель передбачають використання обмеженого переліку об'єктів: виключно капітальні цегляні, залізобетонні чи кам'яні споруди, що мають глибоке закладання фундаменту. При цьому нормативними

документами вводиться сувора заборона закладання знаків у тимчасові будівлі, дерев'яні споруди чи інженерні об'єкти, що зазнають постійного динамічного впливу, зокрема: будівлі та інженерні споруди, розташовані поблизу ліній метрополітену мілкого закладання, великих залізничних вузлів або трамвайних колій, які не обладнані сучасними системами віброізоляції. Крім конструктивного матеріалу, критично важливою є вимога до стабільності: будівля має пройти повну стадію первинного осадження та стабілізації, через що вік споруди повинен становити не менше 3–5 років на момент проведення монтажних робіт.

Безпосередній технологічний процес закладання знака типу 143 складається з кількох послідовних етапів, кожен з яких впливає на кінцеву стійкість геодезичного пункту. Першочерговим завданням на підготовчій стадії є визначення оптимальної висоти: як правило, марку розміщують на рівні 0.3–0.6 м від поверхні землі або захисної відмостки будинку безпосередньо у його цокольній частині чи фундаментальних блоках, що гарантує зручність для подальшого встановлення геодезичних приладів, відбивачів та нівелірних рейок. Безпосередні монтажні роботи виконують за такою схемою: спочатку здійснюється буріння горизонтального отвору за допомогою перфоратора на довжину хвостовика марки, після чого проводиться ретельне очищення порожнини від пилу та її зволоження, а завершальним кроком є використання міцних цементних розчинів марки не нижче М400 або сучасних епоксидних клейових сумішей для надійної і безлюфтової фіксації хвостовика марки у стіні споруди.

Успішна експлуатація створеної мережі на території м. Харкова неможлива без обов'язкового врахування специфіки інженерно-геологічних умов місцевості, які суттєво ускладнюють збереження стабільності геодезичних центрів. Головною загрозою для довготривалої стійкості будівельносіїв є вплив просадних лесових ґрунтів, які є типовими для більшості платоподібних ділянок Харкова, зокрема: зазначені несприятливі території охоплюють Нагірний район, Салтівський житловий масив та Олексіївку. За

умов випадкового або сезонного замочування такі ґрунти здатні спричинити раптові вертикальні деформації та нерівномірне осадження навіть капітальних фундаментів.

Для мінімізації цих ризиків геодезистами застосовуються спеціальні методи протидії деформаціям ґрунту: закладання марок виключно у будівлі на пальових або глибоких стрічкових фундаментах, які повністю прорізають товщу лесу і спираються на щільні непросадні шари, а також ретельний облік можливих підтоплень та коливань рівня ґрунтових вод, що є критично важливим під час проектування ходів у низинних районах міста та безпосередньо у долинах річок Лопань, Харків і Уди.

Завершальним етапом комплексу геодезичних робіт із розгортання планово-висотної основи є її належне технічне та інформаційне оформлення, яке забезпечує швидкий пошук точок на місцевості та їхній довготривалий захист від випадкових пошкоджень під час господарської діяльності. Специфічні чинні вимоги до зовнішнього оформлення пунктів у місті враховують архітектурно-естетичні обмеження щільної урбанізованої забудови, тому замість масивних зовнішніх знаків, які встановлюються у відкритій місцевості, тут застосовують локальні методи ідентифікації. Головним інструментом у цьому процесі є маркування знаків: нанесення масляною фарбою трафаретних написів із зазначенням номера пункту та абревіатури організації, що виконувала роботи, безпосередньо поблизу місця розташування центрів на стінах або захисних ковпаках. Для стінних марок та реперів також передбачено встановлення охоронних табличок (якщо це дозволяє архітектурний вигляд будівлі), які офіційно інформують населення та комунальні служби про державну цінність знака та законодавчу заборону його пошкодження.

Стабільність та експлуатаційна придатність створеної планово-висотної мережі протягом тривалого часу забезпечуються шляхом періодичного інструментального та візуального контролю. Загальний порядок обстеження та моніторингу геодезичних пунктів відповідно до положень чинного

законодавства базується на регулярному виконанні комплексу діагностичних заходів, де ключове місце посідає технологія інструментального та візуального обстеження: перевірка фізичної цілісності знака, стабільності будівлі-носія, наявності взаємної видимості між суміжними пунктами (особливо актуально для міських ходів полігонометрії). Своєчасне виявлення деформацій стін споруд або втрати видимості через розростання зелених насаджень дозволяє оперативно вносити корективи в геодезичні розрахунки та планувати роботи з відновлення пунктів.

Результати кожного циклу моніторингу підлягають обов’язковій правовій та технічній фіксації, що гарантує актуальність геодезичного фонду міста. Складання та ведення звітної документації (картки обстеження) вимагає високої точності й дотримання державних стандартів. Наразі діють суворі правила заповнення офіційної форми картки обстеження та оновлення: опис типу центру, стану моноліту, марки та її безпосереднього зовнішнього оформлення. Невід'ємною складовою такого технічного обліку виступає методика ведення абрисів прив'язки: детальне креслення місцеположення знака з лінійними прив’язками (мінімум три напрямки) до постійних орієнтирів (кути капітальних будівель, виступи цоколів), використання фотофіксації пункту (загальний план та макрозйомка марки), що дозволяє безпомилково ідентифікувати точку за будь-яких умов зміни міського ландшафту.

Для запобігання передчасному руйнуванню пунктів внаслідок капітальних ремонтів чи будівництва нормативно-правовими актами України передбачено впровадження спеціальних територіальних обмежень навколо кожного об'єкта. Встановлення та правовий режим охоронних зон навколо геодезичних знаків є обов’язковою умовою безпечного функціонування міської геодезичної мережі. Законодавством визначені такі нормативні розміри охоронних зон: для ґрунтових знаків - земельна ділянка площею у межах охоронного кургану/в межах 1 кв. м; для стінних марок - обмеження на проведення будівельних чи ремонтних робіт на фасаді будівлі у радіусі пункту,

які можуть призвести до його лінійного чи висотного зміщення або повного знищення. Юридичне забезпечення цього процесу покладається на органи місцевого самоврядування та виконавців робіт, якими безпосередньо здійснюється взаємодія із балансоутримувачами будівель та земельних ділянок: порядок підписання зобов'язань про збереження геодезичних знаків чітко покладає відповідальність на власників нерухомості за цілісність та недоторканність елементів Державної геодезичної мережі [10-18].

2.5 Особливості математичної обробки геодезичних мереж в сучасних умовах

Математична обробка результатів геодезичних вимірів обов'язково розпочинається з етапу попередньої обробки та ретельного камерального контролю, першочерговим завданням якого є імпорт та верифікація первинної інформації. Ця процедура передбачає безпосередній експорт сирих даних (raw data) з внутрішніх накопичувачів сучасних геодезичних приладів: електронних тахеометрів, супутникових ГНСС-приймачів та цифрових нівелірів до спеціалізованого камерального програмного забезпечення. Під час цього процесу здійснюється суворий контроль цілісності файлів та повноти записів: перевіряється наявність усіх виміряних супутникових векторів, планових кутів, віддалей та перевищень, а також своєчасно усуваються можливі технічні збої чи випадкові дублювання назв пікетів, які могли виникнути безпосередньо під час виконання польових робіт.

Наступним кроком камеральної підготовки є введення метеорологічних та приладових поправок, що дозволяє мінімізувати вплив зовнішнього середовища та інструментальних факторів на точність кінцевих результатів. Для лінійних вимірів виконується автоматичне або ручне врахування фізико-атмосферних умов, зафіксованих безпосередньо у момент виконання польових робіт: у числові значення віддалей вводяться редукційні поправки за температуру навколишнього повітря, атмосферний тиск та відносну вологість.

Одночасно з цим проводиться уточнення геометричних параметрів ліній шляхом урахування постійної приладу (так званої приладової поправки) та константи використовуваного відбивача, що дозволяє повністю виключити систематичні похибки інструментального походження ще до початку зрівнювальних обчислень.

Завершальним етапом попередньої обробки є редукція вимірів на поверхню референц-еліпсоїда та площину картографічної проєкції. На цьому етапі здійснюється математичне врахування впливу кривини Землі та вертикальної рефракції атмосфери, які суттєво викривляють результати тригонометричного нівелювання та точних кутових вимірів на місцевості. Процедура математичної редукції довжин ліній забезпечує послідовний перехід від фактично виміряних на похилій фізичній поверхні віддалей до геодезичних ліній на поверхні прийнятого референц-еліпсоїда, а надалі — до їхніх проєкцій на площину: такий підхід повністю усуває лінійні спотворення та є базовою передумовою для подальшого суворого обчислення координат у заданій системі.

Основу математичної обробки надлишкових геодезичних вимірів становить суворе зрівноваження за методом найменших квадратів: фундаментальний математичний принцип, виражений умовою $[pv^2] = \min$, дозволяє ефективно усунути неминучі геометричні суперечності, що виникають у геодезичних мережах через вплив випадкових похибок. Наявність надлишкових вимірів у ходах і полігонах неминуче призводить до появи нев’язок, які не дозволяють однозначно визначити просторове положення пунктів без попереднього математичного втручання. Застосування цього методу забезпечує знаходження найімовірніших значень шуканих величин, гарантуючи при цьому мінімізацію суми квадратів поправок, помножених на відповідні ваги вимірів, що робить отриману оцінку параметрів незміщеною та математично обґрунтованою.

Практична реалізація зрівнювальних обчислень найчастіше здійснюється за допомогою параметричного способу, відомого також як метод

координат або вузлів: його суть полягає у виборі необхідних і незалежних параметрів, у якості яких виступають наближені координати пунктів, що визначаються на місцевості. Для кожного виконаного виміру складаються лінеаризовані параметричні рівняння поправок, які зв'язують шукані координати з виміряними плановими елементами: лініями, кутами, дирекційними кутами чи тривимірними векторами супутникових спостережень, а також перевищеннями у висотних ходах. На основі цих рівнянь формується матриця коефіцієнтів параметричних рівнянь A та діагональна або повна вагова матриця вимірів P, які відображають ступінь довіри до кожного окремого польового спостереження. Кінцевим етапом цього процесу є складання та розв'язання системи лінійних нормальних рівнянь параметричним способом, що дає змогу отримати остаточні вектори поправок до наближених координат і обчислити остаточні зрівноважені значення.

Альтернативним підходом до математичної обробки є корелатний спосіб зрівноваження, який базується на методі умов або полігонів: він передбачає попереднє визначення чіткої кількості та конкретних видів геометричних умов, притаманних замкнутим фігурам, ходам і полігонам геодезичної мережі. До таких умов відносяться умови фігур, полюсів, базисів, дирекційних кутів, а також координатних приростів у замкнутих контурах чи між вихідними опорними пунктами. На основі виявлених залежностей складаються умовні рівняння поправок та виконується обчислення фактичних геометричних нев'язок f_x, f_y, f_β, f_h, які демонструють ступінь відхилення реальних польових даних від теоретичних геометричних законів. Шляхом складання нормальних рівнянь зв'язку обчислюються корелати, що виконують роль множників Лагранжа, на основі яких здійснюється подальший розрахунок остаточних поправок у виміряні величини та їх повний геометричний розподіл по всій мережі.

Під час спільного проектування міських мереж враховуються вагомі особливості зрівноваження планових та висотних ходів, які мають певні математичні відмінності: планові лінійно-кутові мережі або просторові

супутникові побудови вимагають двовимірного або тривимірного моделювання з урахуванням кутової орієнтації, тоді як висотна геодезична основа функціонує в одновимірному координатному просторі. Суміщення алгоритмів зрівноваження лінійно-кутової мережі (полігонометрії чи ГНСС-векторів) та висотної геодезичної основи у вигляді геометричного чи супутникового нівелювання потребує коректного узгодження систем ваг, оскільки лінійні похибки планової мережі та похибки визначення висот підпорядковуються різним законам накопичення випадкових помилок і мають різні джерела інструментального впливу.

Заключною і критично важливою частиною обчислювального процесу є детальний аналіз точності за результатами зрівноваження: першочергово виконується обчислення середньої квадратичної похибки одиниці ваги μ, яка характеризує загальну якість польового матеріалу та адекватність обраної математичної моделі. На основі отриманої коваріаційної матриці параметрів здійснюється розрахунок середніх квадратичних похибок зрівноважених координат m_x, m_y та висот m_h для кожного пункту проектованої мережі. Для наочної графічної оцінки та локалізації найслабших місць створеної геодезичної основи проводиться побудова та аналіз еліпсів похибок планового положення пунктів: це дозволяє визначити просторову орієнтацію та величину максимальних і мінімальних зміщень, гарантуючи надійність і геометричну точність усіх подальших інженерно-геодезичних робіт на об'єкті.

Сучасний етап розвитку інженерної геодезії характеризується повною цифровізацією обчислювальних процесів, що вимагає ретельного огляду та обґрунтування вибору обчислювальних комплексів для камеральної обробки польових матеріалів. Для виконання спільної математичної обробки класичних лінійно-кутових та супутникових вимірів у виробничій практиці застосовується ряд провідних програмних продуктів, серед яких ключове місце посідають розробки світових лідерів: Leica Infinity, Trimble Business Center та вітчизняний комплекс Credo DAT. Порівняльний аналіз функціональних можливостей цих обчислювальних платформ показує, що

кожен із них має свої унікальні технологічні переваги: програмне забезпечення Leica Infinity відзначається глибокою інтеграцією з фірмовим інструментарієм, безпомилковим імпортом сирих даних та потужними інструментами тривимірної візуалізації, комплекс Trimble Business Center є визнаною універсальною платформою з надзвичайно строгими алгоритмами обробки базових ліній ГНСС та можливістю гнучкого налаштування регіональних референц-систем, а система Credo DAT залишається незамінним інженерним стандартом завдяки детально опрацьованим алгоритмам зрівнювання класичних наземних мереж тріангуляції та полігонометрії. Вибір конкретного програмного комплексу для проектованої міської мережі базується на об'єктивній потребі створення єдиного інтегрованого обчислювального середовища, що здатне сумісно обробляти гетерогенні просторові дані без втрати їхньої кінцевої метричної точності.

Невід'ємною складовою сучасної камеральної обробки є автоматизований пошук та відбраковування грубих помилок і промахів, які можуть з'явитися у польових матеріалах через несприятливі умови спостережень, людський чинник або раптові інструментальні збої. Сучасні обчислювальні комплекси вирішують це критичне завдання шляхом застосування вбудованих у програмне забезпечення строгих статистичних критеріїв: для тестування залишків та виявлення поодиноких грубих помилок у польових даних використовуються відомі в математичній геодезії тести Поупа, Баарди (відомий як метод data snooping) або критерій τ. Математична сутність цих методів полягає в детальному аналізі нормованих або стандартизованих залишків рівнянь поправок, що дозволяє виявити ті конкретні виміри, які математично не узгоджуються із загальною геометричною моделлю створеної мережі та суттєво перевищують встановлені теоретичні пороги ймовірності. Такий автоматизований статистичний контроль дозволяє локалізувати дефектні кутові чи лінійні спостереження ще до запуску фінального зрівнювання, повністю запобігаючи негативному ефекту "розтікання" помилки по всій геодезичній мережі.

Заключне очищення масиву геодезичних даних передбачає прискіпливий аналіз величин поправок у зрівноваженій мережі та відсікання векторів чи вимірів, які не задовольняють вимогам нормативної точності. Програмне забезпечення в автоматичному або інтерактивному режимі формує розгорнуті відомості залишків, де аналізуються лінійні та кутові відхилення кожного геодезичного променя або супутникового вектора від їхнього геометрично найімовірнішого положення. Якщо величини отриманих поправок або показники внутрішньої збіжності свідчать про наявність недопустимої похибки, такі супутникові вектори (особливо ті, що характеризуються низьким коефіцієнтом фіксації фази розв'язків або незадовільним значенням розмиття точності PDOP) чи окремі лінійні виміри повністю виключаються з математичної обробки. Такий багаторівневий автоматизований контроль якості гарантує, що до фінального звітного каталогу увійдуть лише ті пункти, геодезична основа яких безкомпромісно відповідає вимогам нормативних інструкцій та державних будівельних норм.

Сучасне геодезичне виробництво вимагає чіткого розуміння математично-геодезичної характеристики використовуваних систем координат, оскільки виконання робіт у межах великих міст часто супроводжується необхідністю одночасного оперування кількома просторовими базисами. Державна геодезична референцна система координат УСК-2000, що є офіційною основою для ведення державних кадастрів та топографічних зйомок в Україні, орієнтована на референц-еліпсоїд Красовського та використовує рівнокутну поперечно-циліндричну картографічну проєкцію Гаусса-Крюгера. Математичний зв’язок УСК-2000 із загальноземною геоцентричною системою координат ITRS/WGS-84 забезпечується через строго визначені параметри просторового переходу, що дозволяє виконувати високоточне редукування ГНСС-спостережень. Паралельно з цим під час реконструювання міських мереж доводиться опрацьовувати архівні матеріали в регіональній системі координат СК-63: ця система характеризується специфічним поділом на триградусні зони,

власними унікальними осьовими меридіанами для кожного району та умовно введеними поправками за зміщення по осях X та Y, які свого часу були впроваджені задля обмеження вільного доступу до картографічних матеріалів. Особливе практичне значення для виконання інженерних вишукувань на досліджуваній території має Місцева система координат міста Харкова (МСК м. Харків): історія її формування безпосередньо пов'язана з геодезичним забезпеченням генерального плану та масштабною забудовою міста, а її математичний зв'язок із державними системами базується на локальних масштабних коефіцієнтах, кутах розвороту та просторових зміщеннях, які визначають специфіку її тривалого застосування для ведення чергового плану міста та формування великомасштабної топографічної основи.

Для забезпечення метричної сумісності згаданих просторових масивів використовуються строгі алгоритми та методи математичної трансформації, вибір яких залежить від розмірності даних та наявності вихідних геодезичних параметрів. Просторова трансформація здійснюється за константними параметрами переходу на основі семипараметричного тривимірного перетворення Гельмерта: математична модель цього процесу включає в себе три лінійні зміщення по осях координат, три кути розвороту осей навколо геометричного центра та один глобальний масштабний коефіцієнт, що сукупно враховує деформації та різницю лінійних масштабів між геодезичними системами. У випадках, коли точні просторові параметри є закритими або математична модель трансформується виключно на площині, застосовується плоска трансформація: афінне та конформне 2D-перетворення координат виконується на основі масиву суміщених (опорних) пунктів, які мають відомі та надійно верифіковані координати одночасно у вихідній та цільовій системах, що дає змогу математично вирахувати унікальні коефіцієнти проєкції безпосередньо для локальної ділянки робіт.

Фінальним кроком камеральної обробки вимірів є практична реалізація перерахунку координат у спеціалізованому програмному забезпеченні, що дозволяє мінімізувати вплив випадкових похибок та повністю автоматизувати

обчислювальні операції. Процес інженерних розрахунків передбачає обов'язкове виконання процедури калібрування (локалізації) конкретної ділянки робіт у вибраному сучасному програмному комплексі Trimble Business Center або Leica Infinity. Під час цього процесу виконується пошук оптимальних математичних зв'язків між сирими супутниковими визначеннями у системі WGS-84 або державними координатами УСК-2000 та існуючими пунктами геодезичної основи у Місцевій системи координат міста Харкова. Програмні алгоритми на основі введених опорних пунктів обчислюють локальні параметри плоского і висотного переходу, що усуває залишкові нев'язки та забезпечує безпомилковий і точний перехід між системами координат під час фінального формування топографічних планів, гарантуючи їх повну відповідність вимогам нормативних інструкцій [10-18].

3 ПРОЄКТУВАННЯ ПЛАНОВО-ВИСОТНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНОГО МАЙДАНЧИКА В МІСТІ ХАРКІВ

3.1 Формування схеми та обґрунтування планово-висотної основи мережі будівельного майданчика

Географічне розташування та геоморфологічні особливості об'єкта проєктування безпосередньо визначають комплекс інженерно-геодезичних рішень. Місто Харків розташоване на стику Середньоруської височини та Полтавської акумулятивної рівнини, що задає характерні риси його топографічних умов. Об’єкт проєктування розташований у північно-західній частині міста, в межах Шевченківського адміністративного району, на території історичного мікрорайону Павлівка. Рельєф безпосередньо в районі виконання робіт характеризується як слабохвилястий, із загальним ухилом поверхні у західному та південно-західному напрямках - у бік заплави річки Лопань. Близькість до ерозійних систем міських водних артерій, зокрема безпосереднє сусідство із басейном річки Лопань та її малою притокою - річкою Саржинкою (що протікає на південний захід від об'єкта), зумовлює розвиток локальних ерозійних процесів, високе залягання ґрунтових вод та наявність розгалуженої мережі понижень рельєфу.

Кліматичні умови району є помірно-континентальними із чітко вираженою сезонністю. Нормативна середня глибина промерзання ґрунту для Харкова становить близько 0,9–1,1 м, що зумовлює конструктивні особливості закріплення геодезичних пунктів: відповідно до нормативних вимог типу центрів для тривалого збереження вони повинні закладатися нижче лінії сезонного промерзання щонайменше на 0,5 м. Це дозволяє повністю уникнути вертикальних деформацій та зсувів знаків під час весняного розмерзання ґрунтового масиву, що особливо актуально для зволожених заплавних ґрунтів Павлівки.

На даній території передбачається реалізація будівельного проєкту, а саме: будівництво сучасного 16-поверхового житлового комплекса, обладнаного підземним паркінгом. Оскільки зведення багатоповерхових споруд пов'язане з підвищеними навантаженнями на ґрунтову основу та складними архітектурно-планувальними рішеннями, відповідно до положень чинного законодавства цей об'єкт за рівнем потенційної небезпеки належить до класу наслідків (відповідальності) СС2. Зазначений клас відповідальності висуває суворі вимоги до точності геометричних параметрів: розробка та розгортання планово-висотної мережі на майданчику мають забезпечувати мінімальні похибки, які б гарантували надійний винос головних осей споруди та безаварійний монтаж будівельних конструкцій.

Безпосередня земельна ділянка під будівництво охоплює площу 1,4 га та має чітко виражені межі в умовах існуючої міської інфраструктури, де з західного боку майданчик обмежений вулицею Мирною, зі східного боку межа проходить вздовж вулиці Юрія Пояркова (яка відділяє об'єкт від чинної багатоповерхової житлової забудови, а трохи далі на схід розташована велика транспортна артерія — вулиця Клочківська), з північного боку ділянка межує з територіями СКП «Харківзеленбуд», Спортивного комплексу ХНЕУ та житловими будинками по вулиці Близнюківській, а з південного боку межа замикається створом Самарської вулиці. На поточний момент внутрішня територія обведеної ділянки перебуває в стані очікування освоєння та покрита щільною деревно-чагарниковою рослинністю. Специфіка цієї локації створює комплексні ускладнення для проведення вишукувань через фізичні перешкоди для прямої видимості, зони затінення ГНСС-сигналу та високу щільність підземних інженерних мереж навколо майданчика (рис. 3.1).

Рисунок 3.1 – Схема меж земельної ділянки площею 1,4 га в умовах існуючої забудови мікрорайону Павлівка

Для створення надійної вихідної геодезичної основи та прив'язки об'єкта до загальнодержавної системи координат використовуються три існуючі вихідні пункти Державної геодезичної мережі (ДГМ) 3-го класу, що розташовані у суміжних районах міста: пункт 3-го класу «Павлове Поле», пункт 3-го класу «Університетська» та пункт 3-го класу «Олексіївка». Математичне обчислення та фіксація планового положення проєктувальної мережі відносно зазначеної вихідної тріади виконується безпосередньо в Місцевій системі координат міста Харкова (МСК м. Харків). Зазначені три пункти тріангуляції використовуються у проєкті як жорстка контрольна основа для забезпечення системного нагляду за якістю та виявлення можливих локальних деформацій міського середовища (рис. 3.2).

Рисунок 3.2 – Схема розташування вихідних пунктів Державної геодезичної мережі 3-го класу («Павлове Поле», «Олексіївка», «Університетська») відносно району робіт

Враховуючи обмежену площу ділянки (1,4 га) та складні умови видимості всередині лісистого пустиря, формування планово-висотної основи оптимізується шляхом безпосереднього розгортання робочої знімальної мережі об'єкта робіт. В мемах будівельного майданчика за допомогою сучасного двочастотного геодезичного ГНСС-приймача (GPS) закладаються два базові пункти знімальної мережі. Проєктування та оцінка точності цієї мережі повністю спирається на вимоги чинного законодавства. Відповідно до цього нормативного документа, пункти згущення та знімальної мережі більше не поділяються на класи чи розряди, а точність їхнього закладання визначається виключно величиною середньої квадратичної похибки відносно вихідних пунктів ДГМ. Для забудованої території міста та масштабу зйомки 1:500 встановлено такі граничні критерії: середня квадратична похибка планового положення точок не повинна перевищувати 0,05 м, за висотою на твердому покритті навколо ділянки - 0,05 м, а безпосередньо на ґрунтовій поверхні майданчика - 0,15 м, що становить третину від нормативного висотного перерізу рельєфу в 0,5 м.

Послідовність виконання робіт із розгортання планово-висотної основи на майданчику чітко регламентується діючим законодавством та складається з декількох взаємопов'язаних етапів: на початковому етапі здійснюється збір офіційних вихідних координат трьох пунктів 3-го класу та аналіз супутникового вікна видимості для планування польових сесій. Надалі проводиться рекогносцирування місцевості, в ході якого перевіряється збереженість пунктів «Павлове Поле», «Олексіївка», «Університетська», а також обираються місця та фізично закладаються два нові пункти знімальної мережі безпосередньо на будівельному майданчику: при цьому між двома новими точками обов'язково забезпечується стійка пряма оптична видимість, необхідна для подальшого орієнтування кутомірних приладів.

Основним етапом є польові ГНСС-вимірювання, під час яких на двох нових пунктах виконується накопичення супутникових даних у режимі «Статика» або «Швидка статика» з одночасним (або послідовним) інструментальним контролем на трьох вихідних державних пунктах тріангуляції. На завершальному етапі в камеральних умовах за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення виконується обчислення базових векторів та сумісне математичне врівноваження мережі, де три пункти 3-го класу виступають жорсткою основою, а для двох нових точок формується звіт про оцінку точності, який документально підтверджує дотримання встановленого п'ятисантиметрового допуску перед початком детальної зйомки та виносу осей 16-поверхового житлового комплексу (рис. 3.3).

Рисунок 3.3 – Проєктна схема планово-висотної основи (робочої знімальної мережі) будівельного майданчика з векторами ГНСС-прив'язки

Таким чином, детальний аналіз геоморфологічних, кліматичних та інфраструктурних умов будівельного майданчика площею 1,4 га в історичному районі Павлівка міста Харкова дозволив сформувати оптимальну та інженерно обґрунтовану схему планово-висотної геодезичної основи. На основі проведеного моделювання та відповідно до вимог законодавства, у проєкті реалізовано сучасний підхід до класифікації точності мереж: замість застарілого поділу на класи й розряди геометричні параметри обґрунтовано виключно величиною середньої квадратичної похибки відносно найближчих пунктів Державної геодезичної мережі.

Для забезпечення потреб будівництва 16-поверхового житлового комплексу з підземним паркінгом (клас наслідків СС2) запроєктовано розгортання цифрової робочої знімальної мережі з двох нових пунктів безпосередньо в межах ділянки: обов'язкове забезпечення прямої оптичної видимості між ними гарантує надійність орієнтування тахеометрів під час подальшої детальної зйомки та розпланувальних робіт. Прив'язка цих пунктів до жорсткої міської тріади вихідних пунктів 3-го класу («Павлове Поле», «Олексіївка», «Університетська») в Місцевій системі координат м. Харків

дозволяє повністю виключити локальні деформації та пов'язати об'єкт із загальнодержавною геодезичною основою.

Математичне моделювання та аналіз умов супутникових спостережень у режимі «Статика» підтверджують повне дотримання встановлених чинним законодавством жорстких допусків: середня квадратична похибка визначення координат у плані та висот на твердому покритті вулиць Мирної та Юрія Пояркова не перевищить граничні 0,05 м, а похибка на залісеному ґрунтовому масиві майданчика складе не більше 0,15 м. Сформована триланкова система графічних схем (меж ділянки, державної геодезичної мережі та планово-висотної основи) наочно демонструє високу надійність запроєктованого геодезичного фундаменту, який повністю задовольняє вимоги для створення цифрового топографічного плану масштабу 1:500 та подальшого безпомилкового винесення головних будівельних осей у натуру [19-25].

3.2 Проєктування планової геодезичної основи майданчика

Побудова планової геодезичної основи на об'єкті будівництва є ключовим етапом, що гарантує точність подальших топографо-геодезичних і будівельно-монтажних робіт на майданчику. Як вихідну основу для розвитку робочого обґрунтування використано існуючі пункти Державної геодезичної мережі України 3-го класу, зокрема пункти "Павлове Поле", "Олексіївка" та "Університетська". Від зазначеної фундаментальної мережі методом супутникових спостережень у режимі «Статика» було визначено координати двох опорних пунктів безпосередньо на границях робочого майданчика: пунктів планово-висотного обґрунтування ПВО-1 та ПВО-2. Ці пункти закладено у місцях, що забезпечують їхнє довготривале збереження та стабільність центрів протягом усього періоду зведення проєкту кутового житлового будинку.

Для безпосереднього топографічного знімання території та винесення проєкту в натуру створено планово-висутню мережу згущення. Проєктування

цієї мережі виконано в універсальному програмному комплексі Digitals на основі актуального картографічного матеріалу та цифрових моделей місцевості. Зважаючи на конфігурацію будівельного майданчика, наявність зелених насаджень навколо річки Саржинка та існуючу забудову вздовж вулиці Мирної, найбільш доцільним технічним рішенням визначено прокладання розімкненого тахеометричного ходу. Цей хід опирається на два вихідні пункти, що дозволяє досягти максимальної надійності геометричних побудов. Проєктна лінія ходу послідовно з'єднує робочі точки під номерами 1, 2, 3, 4 та 5, які огинають контур майбутньої забудови з північного та східного боків для забезпечення повного охоплення ділянки.

Вибір місць для закріплення точок згущення підпорядковано чітким інженерним критеріям: забезпеченню прямої видимості між суміжними станціями, зручності встановлення геодезичних приладів на точках та мінімізації впливу несприятливих чинників довкілля чи будівельної техніки. Довжини ліній між запроєктованими точками становлять від сімдесяти до ста двадцяти метрів, що є оптимальним для виконання точних лінійних та кутових вимірювань сучасними електронними тахеометрами. Графічне моделювання мережі у програмному середовищі дозволило заздалегідь оцінити точність майбутнього ходу та оптимізувати його конфігурацію ще до виходу геодезичної бригади на місцевість, що наочно продемонстровано у вікні розрахункового комплексу (рис. 3.4).

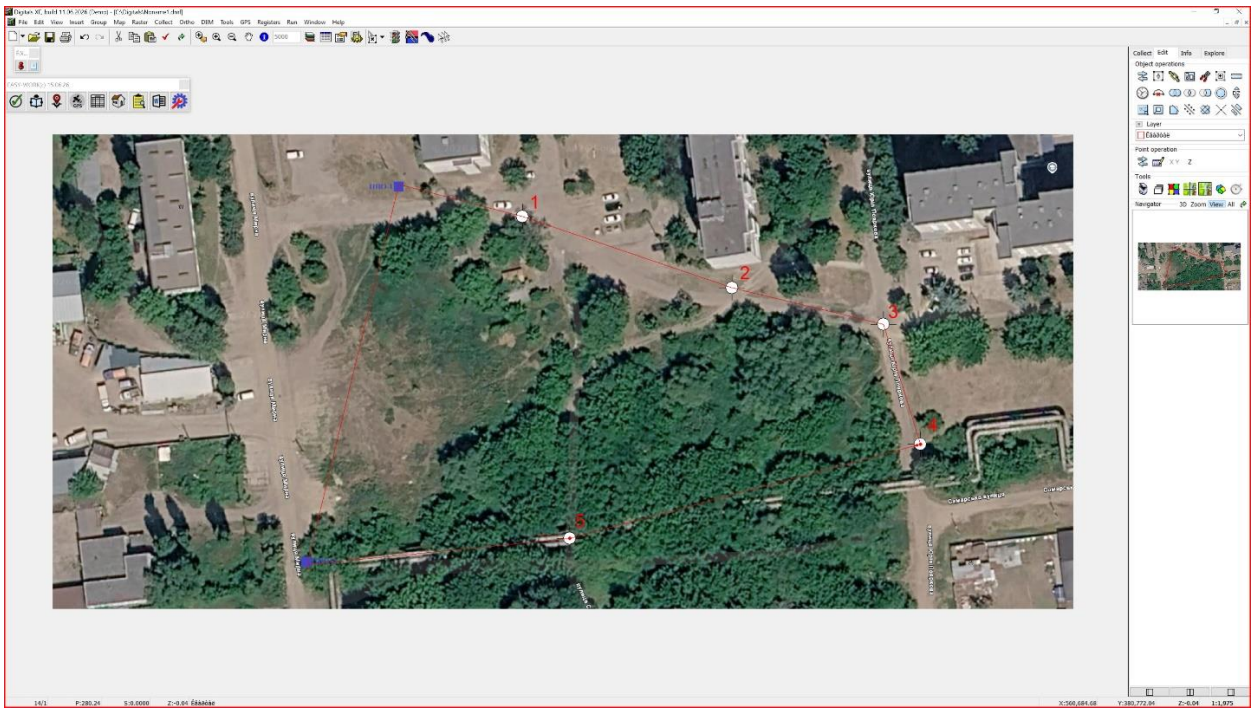


Рисунок 3.4 – Проєкт планово-висотної мережі згущення (розімкненого геодезичного ходу) в інтерфейсі програмного забезпечення Digitals

Математична обробка та ув'язка результатів майбутніх польових вимірювань також здійснюватиметься автоматизовано в програмному комплексі Digitals за методом найменших квадратів. Використання розімкненої схеми ходу надає суттєву інженерну перевагу: можливість суворого незалежного контролю кутових і лінійних нев'язок шляхом порівняння фактичних координат приходу на кінцевий пункт ПВО-2 з його відомими еталонними каталожними даними. Оскільки запроєктована мережа є планово-висотною, кожна робоча точка ходу одночасно з плоскими координатами у Місцевій системі Харкова отримає абсолютну висоту в Балтійській системі висот. Такий підхід дозволить використовувати створену мережу згущення не лише для горизонтальної зйомки, а й для детального вертикального планування території, точного підрахунку об'ємів земляних мас і оперативного контролю глибини закладання фундаментів [19-25].

3.3 Проєктування висотної геодезичної основи майданчика

Забезпечення об'єкта будівництва надійною висотною геодезичною основою є обов'язковою умовою для якісного виконання вертикального планування території, точного винесення в натуру проєктних позначок фундаментів та забезпечення нормативного ухилу майбутніх інженерних мереж. На основі попередньо розробленого планового обґрунтування було спроєктовано схему висотної геодезичної мережі, яка безпосередньо спирається на вихідні пункти з відомими абсолютними висотами у Балтійській системі висот. Створення цієї мережі на будівельному майданчику вздовж вулиці Мирної передбачає трансформацію раніше намічених точок ходу згущення під номерами 1, 2, 3, 4 та 5 у тимчасові робочі репери. Зміна графічних умовних знаків цих точок на схемі на розділені чорно-білі кружки чітко вказує на їхній новий технічний статус як пунктів висотної мережі, відмітки яких підлягають визначенню з високою інженерною точністю.

Для передачі висотних відміток на майданчик проєктування від опорних пунктів ПВО-1 та ПВО-2 передбачено прокладання геодезичного ходу геометричного нівелювання IV класу. Вибір цього методу зумовлений суворими вимогами нормативних інструкцій для топографічного знімання у масштабі 1:500, оскільки він дозволяє максимально нівелювати випадкові та систематичні похибки вимірювань. Повний технологічний процес висотного забезпечення будівельного майданчика реалізується через чітку послідовність дій: спочатку виконується детальне польове обстеження території та остаточне закріплення нівелірних знаків на місцевості металевими штирями або дюбелями, після цього проводиться безпосереднє інструментальне вимірювання перевищень цифровим нівеліром з використанням штрих-кодових рейок, а на фінальній стадії здійснюється автоматизована камеральна обробка отриманих даних. Польові висотні вимірювання плануються виключно методом «з середини» з дотриманням рівності пліч візування,

завдяки чому з розрахунків повністю виключається несприятливий вплив кривизни Землі та рефракції атмосферних шарів.

Графічне моделювання запроєктованої висотної мережі згущення із нанесеними напрямками нівелірних променів та місцями розташування робочих реперів виконано у програмному середовищі Digitals. Це дозволило геодезисту детально проаналізувати геометричні умови майбутнього ходу ще до виходу бригади на місцевість, заздалегідь оцінити очікувану точність визначення висот та переконатися у відсутності фізичних перешкод для візування вздовж берегової лінії річки Саржинка (рис. 3.5).

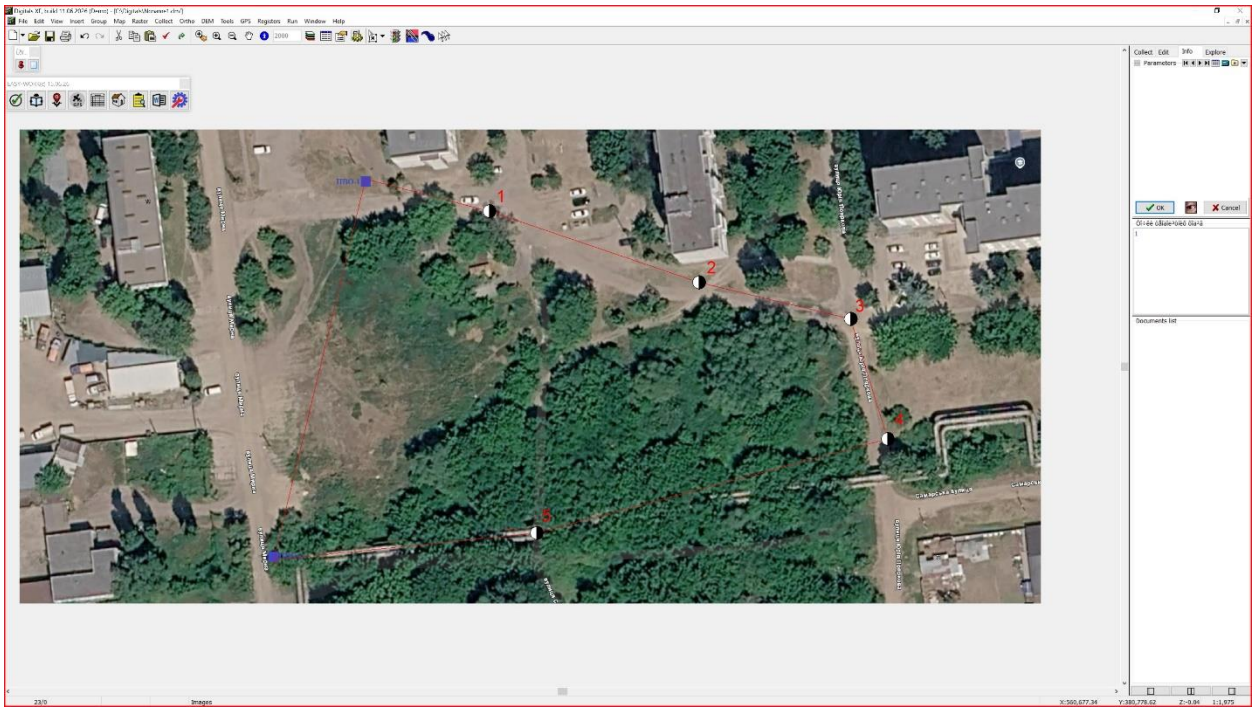


Рисунок 3.5 – Схема висотної геодезичної мережі (нівелірного ходу IV класу) в інтерфейсі програмного забезпечення Digitals

Камеральний етап опрацювання результатів проєктування висотної основи реалізується в розрахунковому модулі програми Digitals, де здійснюється математичне врівноваження нівелірного ходу за методом найменших квадратів. Процес комп'ютерних обчислень передбачає послідовне виконання таких процедур: розрахунок фактичної висотної нев'язки ходу, порівняння її з гранично допустимим нормативним значенням, яке для IV

класу обчислюється за формулою $\pm 20\sqrt{L}$, де L - довжина ходу в кілометрах, та суворий розподіл отриманої похибки пропорційно до кількості станцій або довжини ліній ходу. За результатами зрівнювання програма формує підсумковий каталог абсолютних висот для точок 1–5, який стає головною геодезичною базою для подальшого детального топографічного знімання рельєфу. Отримані точні висотні характеристики пунктів повністю гарантують безпомилковість усіх наступних етапів зведення кутового житлового будинку: від первинної розробки котловану та закладання фундаментів до монтажу відповідальних будівельних конструкцій верхніх поверхів [19-25].

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці при виконанні польових геодезичних робіт

Під час виконання польових геодезичних робіт усі працівники повинні дотримуватися нормативно-правових актів з охорони праці, дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також безпеку і здоров'я оточуючих людей. Кожен спеціаліст, який перебуває в полі, має знати загальні принципи надання першої долікарської допомоги - комплексу заходів, спрямованих на поновлення або збереження життя потерпілого до прибуття медичного працівника. Оскільки геодезичні вимірювання часто проводяться просто неба, існує підвищений ризик температурних уражень. При тепловому або сонячному ударах відбувається приплив крові до мозку, тому потерпілого слід перенести від сонця у тінь чи прохолодне місце, розстібнути стискуючий дихання одяг та покласти на голову холодний предмет. У холодну пору року головним заходом попередження обмороження є змащення відкритих частин тіла жиром або кремом, що затримує у шкірі тепло. При настанні обмороження потерпілого необхідно віднести у тепле приміщення та зігрівати уражені кінцівки у посудині з водою, поступово доводячи її температуру до 39-40°С. Специфіка роботи на пересіченій місцевості також зумовлює ймовірність отримання механічних травм. За підозри перелому чи вивиху пошкоджену кінцівку слід укріпити шиною (дошкою, палицею) таким чином, щоб зробити нерухомими два найближчі суглоби. У випадку поранення та виникнення кровотечі необхідно діяти за таким алгоритмом: підняти поранену кінцівку вверх; закрити кровоточиву рану перев'язочним матеріалом і придавити її зверху на 4-5 хвилин; за умови сильної кровотечі накласти джгут або закрутку з підручного матеріалу вище місця кровотечі на час, що не перевищує 1-2 години, обов'язково залишивши записку про точний час накладання. Ще одним специфічним ризиком польових робіт є контакт із дикою фауною. За будь-якого укусу тварини шкіру навколо рани або подряпини треба змастити настоянкою

йоду і накласти стерильну пов'язку, після чого потерпілого необхідно направити до медичного закладу для перевірки щодо необхідності проведення щеплень проти сказу. У всіх надзвичайних ситуаціях, які загрожують життю, слід підтримувати основні життєві функції потерпілого та негайно викликати швидку медичну допомогу за телефоном 103 або іншим телефоном найближчого медичного закладу.

Ефективна охорона праці під час виконання польових геодезичних робіт безпосередньо залежить від рівня підготовки персоналу та його вміння швидко реагувати на специфічні ризики відкритої місцевості. Суворе дотримання правил техніки безпеки, навички ізоляції потерпілого від джерела небезпеки, а також чітке знання алгоритмів зупинки кровотеч, іммобілізації при переломах та надання допомоги при теплових ударах чи укусах тварин дозволяють мінімізувати важкість наслідків травмування. Життя людини в умовах віддаленості від населених пунктів прямо пов'язане з діями осіб, які перебувають поруч, тому кожен працівник у полі повинен володіти прийомами само- і взаємодопомоги до моменту прибуття кваліфікованих медичних працівників [20-23].

4.2 Охорона праці при виконанні камеральних геодезичних робіт

Камеральні геодезичні роботи проводяться в умовах офісних приміщень і пов'язані з тривалим перебуванням за комп'ютером, опрацюванням картографічних матеріалів та використанням складного електронно-цифрового обладнання. Специфіка такої діяльності вимагає суворого дотримання правил електробезпеки, оскільки несправність проводки чи офісної техніки створює ризик ураження електричним струмом. У разі виникнення такої ситуації першочерговим завданням є швидке звільнення потерпілого від дії струму шляхом знеструмлення установки або використання сухого дерев'яного предмета. Якщо у працівника відсутні ознаки життя, необхідно негайно на місці події розпочати реанімаційні заходи: штучне

дихання та непрямий масаж серця, які виконуються до приїзду бригади швидкої медичної допомоги. Окрім цього, під час камеральних робіт у закритому приміщенні існує ймовірність раптового загострення хронічних хвороб у персоналу, зокрема нападів епілепсії, при яких важливо оперативно повернути голову людини набік і вкласти між зуби згорнуту хустку для запобігання травмуванню.

Сучасні реалії камеральної діяльності геодезистів в Україні також тісно пов'язані з обробкою даних із територій, де велися бойові дії, що вимагає врахування факторів мінної небезпеки під час створення цифрових моделей місцевості. Спеціалісти під час дешифрування знімків та перенесення польових нотаток на карти зобов'язані чітко фіксувати ділянки, що містять попереджувальні знаки про загрозу вибухонебезпечних предметів. Окрім інформаційної роботи, для офісних працівників залишається актуальним ризик виникнення надзвичайних ситуацій воєнного чи техногенного характеру безпосередньо у будівлі підприємства. При виявленні підозрілих предметів або отриманні сигналів про загрозу вибуху в офісі персонал повинен діяти за чітким алгоритмом цивільного захисту: зберігати особистий спокій та не піддаватися паніці, оскільки це дозволяє спецслужбам працювати максимально ефективно; у разі оголошення офіційного повідомлення про евакуацію негайно залишити робоче місце та вийти у безпечну зону; беззаперечно виконувати всі вказівки і розпорядження представників правоохоронних органів або рятувальних служб.

Аналіз безпекових вимог показує, що ефективна охорона праці геодезистів як під час польових виїздів, так і під час камеральної обробки даних базується на поєднанні двох ключових факторів: чіткому знанні алгоритмів надання першої долікарської допомоги при травмах чи ураженнях струмом та суворому дотриманні правил мінної безпеки й евакуації. Життя та здоров'я працівників у надзвичайних ситуаціях прямо залежать від їхнього вміння зберігати спокій, діяти злагоджено і неухильно виконувати інструкції цивільного захисту [20-23].

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті виконано комплексне дослідження та розроблено проєкт сучасної планово-висотної основи для будівництва в місті Харків. За результатами проведеної роботи, виконаних теоретичних узагальнень і математичних розрахунків сформульовано такі основні висновки:

– здійснено детальний аналіз існуючого стану міської геодезичної мережі;

– визначено нормативні параметри щільності геодезичної основи для територій із високим антропогенним навантаженням: у межах міської забудови Харкова щільність пунктів має становити не менше 2 пунктів на 1 квадратний кілометр, а середня квадратична похибка положення точок знімальної мережі не повинна перевищувати 0,1 міліметра у масштабі створюваного топографічного плану;

– спроєктовано оптимальну схему планової мережі згущення з використанням багаточастотних супутникових GNSS-технологій та української мережі перманентних базових станцій, що забезпечує високу точність та дозволяє нівелювати негативний ефект багатошляховості сигналів, який виникає внаслідок відбиття радіохвиль від скляних і металевих фасадів сучасних міських будівель;

– обґрунтовано методику висотного забезпечення будівельних майданчиків відповідно до положень чинного законодавства з обов’язковим поділом об'єктів за класами наслідків: cc1 (незначні наслідки), cc2 (середні наслідки) та cc3 (значні наслідки), що безпосередньо визначає вибір класу геометричного нівелювання та формулу розрахунку допустимих висотних нев’язок залежно від кількості станцій у ході;

– враховано специфічні гідрогеологічні та геомеханічні умови Харкова, зокрема поширення схильних до просідання лесових ґрунтів, шляхом проєктування закладки геодезичних марок виключно у будівлі на пальових чи глибоких стрічкових фундаментах, а також розміщення робочих реперів поза

призмою обрушення ґрунту навколо котлованів та поза зоною динамічного впливу процесів будівництва.

Розроблений проєкт має безпосереднє практичне значення для будівельної галузі міста Харків, оскільки створена планово-висотна основа гарантує високу геометричну точність під час зведення житлових, промислових та унікальних архітектурних об'єктів, забезпечує надійну базу для подальшого моніторингу деформаційних процесів та фінансово оптимізує геодезичні роботи за рахунок використання передових супутникових технологій.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність [Електрон. ресурс] : Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text (дата звернення : 16.06.2026). – Назва з екрана.

2. Про затвердження Порядку побудови Державної геодезичної мережі [Електрон. ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України від 07.08.2013 № 646. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#Text (дата звернення : 16.06.2026). – Назва з екрана.

3. Про затвердження Порядку обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі [Електрон. ресурс] : Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 03.11.2014 № 435. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text (дата звернення : 16.06.2026). – Назва з екрана.

4. ДБН В.1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 70 с.

5. Інструкція з нівелювання I, II, III і IV класів ГКНТА-2.01-001-93. – Київ : Укргеодезкартографія, 1993. – 56 с.

6. Основні положення створення Державної геодезичної мережі України ГКНТА-2.01-02-01-93. – Київ : Укргеодезкартографія, 1993. – 82 с.

7. Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 [Електрон. ресурс] : Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17.04.2025 № 1675. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу : https://minagro.gov.ua (дата звернення : 16.06.2026). – Назва з екрана.

8. Мороз О. І. Геодезія : підручник / О. І. Мороз, І. Ф. Тревого, А. Л. Сохнич. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2016. – 544 с.

9. Тревого І. С. Інженерна геодезія : навч. посіб. / І. С. Тревого, В. А. Баландюк, В. Р. Гарасимчук. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 436 с.

10. Перій С. С. Основи геодезії : навч. посіб. / С. С. Перій, В. М. Михайлишин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. – 384 с.

11. Шульц Р. В. Супутникова геодезія : навч. посіб. / Р. В. Шульц, Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко. – Київ : КНУБА, 2012. – 408 с.

12. Карпінський Ю. О. Геоінформаційні системи : підручник / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко. – Київ : КНУБА, 2015. – 580 с.

13. Островський А. Л. Геодезія. Частина І. Топографія : навч. посіб. / А. Л. Островський, О. І. Мороз, В. Л. Тарнавський. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 440 с.

14. Островський А. Л. Геодезія. Частина ІІ. Інженерна геодезія : навч. посіб. / А. Л. Островський, О. І. Мороз, В. Л. Тарнавський. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 564 с.

15. Карпінський Ю. О. Сучасний стан та перспективи розвитку Державної геодезичної мережі України / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко // Вісник геодезії та картографії. – 2018. – № 6. – С. 3–12.

16. Тревого І. С. Розвиток геодезичних мереж України на основі ГНСС-технологій / І. С. Тревого, О. В. Кучер // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2020. – Вип. ІІ (40). – С. 15–24.

17. Шульц Р. В. Використання супутникових технологій для модернізації геодезичної інфраструктури України / Р. В. Шульц, С. Г. Нестеренко // Інженерна геодезія. – 2021. – Вип. 68. – С. 24–35.

18. Тревого І. С. Українська мережа перманентних ГНСС-станцій та перспективи її розвитку / І. С. Тревого, В. Р. Гарасимчук // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2019. – Вип. І (37). – С. 10–19.

19. Карпінський Ю. О. Національна інфраструктура геопросторових даних України та геодезичне забезпечення її функціонування / Ю. О. Карпінський // Вісник геодезії та картографії. – 2021. – № 1. – С. 5–16.

20. Шульц Р. В. Методичні аспекти переходу до європейської вертикальної референцної системи EVRS в Україні / Р. В. Шульц, В. В. Колесник // Інженерна геодезія. – 2024. – Вип. 72. – С. 45–57.

21. Губар Ю. П. Використання GNSS-технологій при створенні геодезичних мереж згущення / Ю. П. Губар, І. С. Тревого // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2022. – Вип. 96. – С. 18–29.

22. Баландюк В. А. Геодезичне забезпечення будівництва сучасних інженерних споруд / В. А. Баландюк // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2021. – Вип. I (41). – С. 101–109.

23. Офіційний сайт Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : https://land.gov.ua (дата звернення : 16.06.2026). – Назва з екрана.

24. Офіційний сайт Науково-дослідний інститут геодезії і картографії [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : https://gki.com.ua (дата звернення : 16.06.2026). – Назва з екрана.

25. Official website of the EUREF [Electronic resource]. – Access mode : https://www.euref.eu (access date : 16.06.2026). – Title from screen