

Національний університет «Львівська політехніка»

Міністерство освіти і науки України

На правах рукопису

Смолій Катерина Богданівна

УДК 528.482.5

**ТЕОРЕТИЧНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ
МЕТОДИКИ ОПРАЦЮВАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІЩЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД**

05.24.01 — геодезія, фотограмметрія та картографія

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник –
доктор технічних наук, професор
К.Р. Третяк

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради

/Б. Паляниця/

Львів 2017

АНОТАЦІЯ

Смолій К. Б. Теоретично-експериментальне обґрунтування методики опрацювання геодезичних мереж для визначення зміщень та деформацій гідротехнічних споруд.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія та картографія». – Національний університет «Львівська політехніка», Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2017.

Дисертація містить теоретично-експериментальне обґрунтування методики опрацювання інженерно-геодезичних мереж, що використовують для дослідження зміщень та деформацій інженерних споруд ГЕС. Виконано опис причин та факторів, які зумовлюють деформаційні процеси в інженерних спорудах. На основі аналізу деформаційних процесів встановлено, що комплексні методи їх моніторингу є найефективнішими та дають максимальну точність результатів.

Виконано огляд існуючих методів зменшення впливу систематичних похибок на результати опрацювання результатів вимірювань деформацій та встановлено, що існуючі методи є громіздкими, математично складними та не дозволяють достеменно усунути систематичні похибки з результатів одночасних спостережень. Встановлено, що застосування класичних методів опрацювання геодезичних вимірів у системах автоматизованого моніторингу деформацій інженерних споруд не є ефективними, і тому розроблено модифікований параметричний метод опрацювання корельованих між собою результатів вимірів в режимі реального часу з врахуванням систематичних похибок. Отримано теоретичне обґрунтування методу та рівняння поправок для ГНСС, лінійно-кутових вимірів і тригонометричного нівелювання.

На основі методу статистичних випробувань доведено переваги модифікованого параметричного методу порівняно з класичним параметричним методом опрацювання інженерно-геодезичних мереж залежно від жорсткості мереж, величин систематичних і випадкових похибок, кількості пунктів і конфігурацій мереж. Виведено формули для розрахунку ефективності модифікованого параметричного методу порівняно з класичним параметричним методом залежно від

кількості пунктів, жорсткості та розмірів мереж, величини систематичних і випадкових похибок. Встановлено, що зі збільшенням кількості пунктів в мережі та її жорсткості ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження порівняно з класичним параметричним зростає.

Виведені формули для оцінки точності визначення деформаційних параметрів прогонів напірних трубопроводів ГЕС залежно від точності геодезичних вимірів та апробовано їх на дериваційному трубопроводі Теремле-Ріцької ГЕС. На основі еспериментальних досліджень встановлено, що точність визначення деформацій є на порядок вищою ніж величини самих деформацій.

За результатами опрацювання реальних ГНСС-мереж доведено ефективність використання модифікованого параметричного методу порівняно з класичним параметричним методом. Точність досягає 10÷20% для мереж з ідеальними умовами видимості супутників та задовільною тривалістю спостережень, а для мереж з екстремальними умовами (частково обмежена видимість супутників та занижена тривалість вимірів векторів) помилки визначення координат пунктів при опрацюванні модифікованим параметричним методом є на 10÷50% меншими ніж класичним параметричним, що підтверджує ефективність застосування модифікованого параметричного методу.

На основі апріорного розрахунку точності ГНСС-мереж, виконаного модифікованим параметричним та класичним параметричним методами врівноваження, встановлено, що похибки, визначені класичним параметричним методом, є на 60% меншими ніж реальні помилки, а для модифікованого параметричного методу вони відрізняються у межах 20 %, що вказує на значно більшу достовірність апріорної оцінки точності модифікованого параметричного методу та дозволяє його рекомендувати для врівноваження інженерно-геодезичних мереж, особливо на гідротехнічних спорудах зі складним рельєфом та обмеженими умовами видимості супутників.

Ключові слова: деформація інженерних споруд, методика опрацювання геодезичних мереж, модифікований параметричний метод врівноваження, геодезичний моніторинг ГЕС, систематичні похибки.

Список публікацій здобувача

1. Третяк К. Урівноваження диференційним методом ГНСС мереж з обмеженим доступом до супутникових сигналів / К.Р. Третяк, К.Б. Смолій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів. – 2015. – Вип. 81. – С.25-45.
2. Третяк К. Оцінка точності параметрів деформацій напірних трубопроводів / К. Третяк, К. Смолій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2012. – Вип. 1(23). – С. 115-119.
3. Смолій К. Аналіз сучасних геодезичних та геотехнічних методів моніторингу за деформаціями інженерних споруд / К.Б. Смолій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2015. – №1(29). – С.87-89.
4. Третяк К. Дослідження ефективності урівноваження ГНСС мереж / К.Р. Третяк, К.Б. Смолій, О.В. Серант // Інженерна геодезія. – Київ. – 2015. – С. 32-44.
5. Tretyak K. Modified parameter methods of researching GNSS networks with correlative measurements and systematic errors / K. Tretyak, K. Smoliy // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2017. – №2(34). – С.55-67.
6. Смолій К. Дослідження деформацій архітектурних споруд на прикладі будинку на вулиці Князя Романа у Львові / К.Б. Смолій, Ю.І. Голубінка // Зб. матеріалів XV Міжнародного науково-технічного симпозиуму “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS - технології”. – Алушта (Крим). – 2010. – С. 260-262.
7. Смолій К. Дослідження деформацій напірних трубопроводів / К.Б. Смолій, К.Р. Третяк // Зб. матеріалів XVI Міжнародного науково-технічного симпозиуму “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS-технології”. – Алушта (Крим). – 2011. – С. 64-66.
8. Смолій К. Дослідження зміщення напірного трубопроводу Терезля-Рікської ГЕС на основі одночасних спостережень високоточними тахеометрами / К.Б. Смолій // Зб. матеріалів XVII Міжнародного науково-технічного симпозиуму

“Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS - технології”. – Алушта (Крим). – 2012. – С. 269-270.

ANNOTATION

Smoliy K.B. Theoretical and experimental substantiation of a geodetic networks processing technique for the determination of displacements and deformations of hydraulic structures.

The dissertation on support of candidature for a technical degree, specialty 05.24.01 "Geodesy, photogrammetry, and cartography". Lviv Polytechnic National University. Lviv, 2017.

The dissertation contains theoretical and experimental substantiation of engineering-geodetic networks processing method used in the study of displacements and deformations of the hydroelectric power station's engineering constructions. A description of reasons and factors, which predetermine deformation processes in engineering structures, is provided. Based on the analysis of deformation processes, it is established that complex methods of monitoring are the most effective and give the maximum accuracy of the results.

A review of the existing methods for the reduction of the influence of systematic errors for processing results of measurements of deformations is fulfilled. It is determined that the existing methods are cumbersome, mathematically complex and not reliably eliminate bias from the results of simultaneous observations. The usage of classical methods of geodetic measurements processing in automatic deformation monitoring of engineering structures are not efficient and, therefore, a modified parametric method of treatment of correlated measurements in real time, taking into account systematic errors, has been developed. The theoretical justification of the method and the equations of the amendments for GNSS, linear-angular measurements, and trigonometric leveling have been obtained.

Based on the method of statistical tests the benefits of a modified parametric method compared to the classical parametric method of engineering-geodetic networks processing are proven, depending on the stiffness of the networks, the magnitudes of systematic and random errors, and the number and configurations of networks. Formulas to calculate the efficiency of a modified parametric method compared to the classical parametric method depending on the number of points, stiffness, sizes of networks, and the magnitude of

systematic and random errors are established. It is determined that with the increase in the number of points in the network and its stiffness, efficiency of the modified parametric method of adjustment compared to the classical parametric method, increases.

The formulas for evaluating the accuracy of determining the deformation parameters of the pressure piping HPP runs, depending on the precision of geodetic measurements were developed and tested on high line conduit of Tereble-Ritska HPP. Based on the experimental studies, it is established that the accuracy of determination of deformation is much higher than the values of the deformations themselves.

The results of real GNSS-networks processing proved the effectiveness of a modified parametric method usage compared to the classical parametric method. Accuracy reaches 10÷20% for networks with ideal conditions of satellites visibility and satisfactory duration of observations. For networks with extreme conditions (partially limited satellites visibility and underestimated duration of the vectors measurement) the determination error of points coordinates in the processing of a modified parametric method is 10÷50% lower than the classic parametric method, which confirms the effectiveness of using a modified parametric method.

Based on a priori calculation of GNSS networks precision made by modified parametric and classical parametric balancing methods, it is discovered that errors, determined by the classical parametric method are 60% less than real. For a modified parametric method, they differ in the range of 20%, indicating significantly greater accuracy of the a priori estimates of the modified parametric method's accuracy and allow recommending this method for the adjustment of engineer-geodetic networks, especially for hydraulic structures with rugged topography and restricted visibility of satellites.

Key words: deformation of engineering structures, methods of geodetic networks processing, a modified parametric adjustment method, HPP geodetic monitoring, systematic errors.

List of publisher publications

1. Tretyak K. Differential method's adjustment for GNSS networks with limited access to satellite signals / K. Tretyak, K. Smoliy // Geodesy, Cartography and Aerial Photography. – Lviv. – 2015. Vol. 81. P. 25-45.

2. Tretyak K. Estimate of the accuracy parameters of deformations pressure pipelines / K. Tretyak, K. Smoliy // Modern achievements of geodesic science and industry. – Lviv. – 2012. Issue 1 (23). – P. 115–119.
3. Smoliy K. Analysis of modern geodetic and geotechnical methods of monitoring the structures deformation / K. Smoliy // Modern achievements of geodesic science and industry. – Lviv. – 2015. Issue 1 (29). – P. 87–89.
4. Tretyak K. Research efficiency adjustment for GNSS networks / K. Tretyak, K. Smoliy, O. Serant. // Engineering geodesy. – Kyiv. – 2015. – P. 32–44.
5. Tretyak K. Modified parameter methods of researching GNSS networks with correlative measurements and systematic errors / K. Tretyak, K. Smoliy // Modern achievements of geodesic science and industry. – Lviv. – 2017. Issue 2 (34). – P. 55–67.
6. Smoliy K. Investigation of deformation of architectural constructions on the example of the building on the Knyazia Romana Street in Lviv / K. Smoliy, J. Golubinka // XV International Scientific and Technical Symposium Geoinformation Monitoring of Environment: GPS and GIS technologies. – Alushta (Crimea, Ukraine). – 2010. – P. 260–262.
7. Smoliy K. Investigation of deformations of pressure pipelines / K. Smoliy, K. Tretyak // XVI International Scientific and Technical Symposium Geoinformation Monitoring of Environment: GPS and GIS technologies. – Alushta (Crimea, Ukraine). – 2011. – P. 64–66.
8. Smoliy K. Research of confusion pressure pipelines Tereble-Rikskoyi Hydroelectric based on same time observations using high-precision total stations / K. Smoliy // XVII International Scientific and Technical Symposium Geoinformation Monitoring of Environment: GNSS and GIS technologies. – Alushta (Crimea, Ukraine). – 2012. – P. 269–270.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,.....	10
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП.....	11
1 РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ГЕС.....	17
1.1 ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ГЕС.....	17
1.2 ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД	20
1.2.1 ЕНДОГЕННІ ПРОЦЕСИ	20
1.2.2 ЕКЗОГЕННІ ПРОЦЕСИ	21
1.2.3 ПРОЦЕСИ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ	23
1.3 КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ОСІДАНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ СПОРУД.....	25
1.4 МЕТОДИ ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК	38
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	47
2. РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ НАПІРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ГЕС ГЕОДЕЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ	48
2.1 МОДИФІКОВАНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ВРІВНОВАЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ	49
2.2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДИФІКОВАНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВРІВНОВАЖЕННЯ В ПОРІВНЯННІ З КЛАСИЧНИМ ПАРАМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ.....	59
2.3 РОЗРАХУНОК ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗСУВУ ТА ДЕФОРМАЦІЙ НАПІРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ.....	75
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	91

3. РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВРІВНОВАЖЕННЯ МЕРЕЖ.....	92
3.1 Можливості застосування модифікованого параметричного методу врівноваження ГНСС мереж	92
3.2 Результати врівноваження ГНСС мереж з умовами обмеженої видимості	102
3.3 Лінійно-кутові мережі Теремле-Ріцької ГЕС	121
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	131
ВИСНОВКИ.....	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	134

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Вим – виміряне

ГЕС – гідроелектростанція

ГНСС – глобальна навігаційна супутникова система

Клас – класичний параметричний метод врівноваження

Мод – модифікований параметричний метод врівноваження

Набл – наближене

Пом – помилка

Пох – похибка

GDOP – Geometric Dilution of Precision

LGO – Leica Geo Office

RINEX – Receiver Independent Exchange Format

SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center

TBC – Trimbe Business Center

ВСТУП

Гідроенергетика займає важливе місце в економічному та енергетичному розвитку країн. Переважна більшість ГЕС побудовані десятки років тому, і виникають сумніви щодо надійності 15% всіх світових гребель. Окрім вже працюючих ГЕС щорічно у світі вводять в експлуатацію сотні нових гідроелектростанцій. Резерв експлуатації ГЕС є вичерпний, внаслідок цього щорічно виникають аварії на 5% усіх гідроелектростанцій [77]. Основною причиною аварій є деформаційні процеси, які відбуваються під час експлуатації ГЕС.

Особливості місця розташування, ендегенні, екзогенні та техногенні фактори і експлуатації об'єктів ГЕС зумовлюють деформаційні процеси у всіх інженерних вузлах та спорудах. Якщо деформації перевищують допустимі значення, то можуть виникати порушення цілісності інженерних об'єктів або їх руйнування, тому виникає необхідність у проведенні досліджень за деформаціями гідротехнічних споруд, розташованих на їх території. Для таких досліджень на території ГЕС створюють моніторингові мережі, які дозволяють визначати стабільність споруд та передбачати аварійні ситуації, а також значно убезпечують процес ремонту гідротехнічних споруд.

Необхідно зазначити, що проблемою дослідження деформаційних процесів інженерних споруд ГЕС займалися такі вітчизняні вчені, як: Войтенко С.П., Третяк К.Р., Черняга П.Г., Шульц Р., Гуляев Ю.П., Левчук Г.П. та інші, а також зарубіжні вчені: Nematollah H., Yigit C., Wan A.

Основною метою дослідження є розроблення методів усунення систематичних похибок з результатів одночасних вимірів з метою підвищення точності опрацювання інженерно-геодезичних мереж, для збільшення точності визначення деформацій інженерних споруд ГЕС та скорочення економічних і часових затрат, необхідних для проведення робіт.

Актуальність теми.

Раніше для вивчення деформаційних процесів на території ГЕС створювали геодезичні мережі, на яких проводили циклічні спостереження декілька разів на рік. Основними методами спостереження за деформаціями інженерних споруд були геометричне та тригонометричне нівелювання, триангуляція і трилатерація. На сьогоднішній день широко застосовуються автоматизовані системи спостережень, що включають у себе комплекс геодезичних приладів, таких як: ГНСС-приймачі, високоточні роботизовані тахеометри, інклінометри та інше геотехнічне обладнання. Перевагами цих систем є те, що вони дозволяють визначати деформації у реальному часі, їх швидкість та напрямок. Системи автоматизованого моніторингу дозволяють збільшувати частоту опитування (тобто частоту дискретних вимірів), підвищують точність визначення деформацій та збільшують імовірність попередження аварійних ситуацій. Такі автоматичні системи моніторингу є високовартісними, але за рахунок оперативності отримання високоточних результатів зменшують ймовірність аварійних ситуацій та економлять кошти.

У зв'язку з тим, що ГНСС-приймачі та роботизовані тахеометри виконують виміри одночасно, виникає цілий ряд систематичних похибок, які пов'язані з доступом до сигналу супутників, атмосферними затримками, рефракцією, тощо. Вплив систематичних похибок спотворює результати спостережень. Враховуючи вищезазначене, необхідно розробити механізми та методи врівноваження інженерно-геодезичних мереж, які б дозволяли усунути систематичні похибки з результатів спостережень, виконаних в режимі реального часу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Науково-дослідні роботи автора збігаються з науковим напрямком кафедри вищої геодезії і астрономії «Моніторинг фізичної поверхні Землі та її атмосфери на основі аналізу результатів сучасних наземних і супутникових вимірювань» та відповідають науковій тематиці робіт галузевої науково-дослідної лабораторії

«Геодезичного моніторингу та рефрактометрії» (ГНДЛ-18) і навчально-наукової лабораторії «Опрацювання супутникових вимірювань» Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка».

Результати досліджень автора пов'язані з госпдоговірною та науково-дослідною роботою:

- «Спостереження за деформаціями інженерних споруд Теремле-Ріцької ГЕС» № держ. реєстр. 0103U001375;

- «Постачання та встановлення внутрішньої перманентної системи моніторингу деформацій» для Дніпровської, Дніпродзержинської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС, контракт № УНЕ/Т-DAM2-20/09.

Мета і задача досліджень.

Основною метою роботи є теоретично-експериментальне обґрунтування методики максимального вилучення систематичних похибок для підвищення точності та достовірності результатів опрацювання геодезичних мереж при визначенні зміщень та деформацій гідротехнічних споруд.

Основними завданнями дисертаційної роботи є:

- на основі критичного аналізу існуючих методів і засобів визначення деформацій інженерних споруд розробити новий модифікований параметричний метод опрацювання комплексних геодезичних вимірів для підвищення точності та достовірності отриманих результатів за рахунок вилучення систематичних похибок;
- за результатами геодезичних вимірів розрахувати оцінку точності параметрів деформацій окремих елементів ГЕС, зокрема напірного трубопроводу, як одного з найнебезпечніших вузлів ГЕС;
- обґрунтувати статистичними методами точність, ефективність та достовірність модифікованого параметричного методу врівноваження інженерно-геодезичних мереж порівняно з класичним параметричним методом;

- експериментально довести переваги застосування модифікованого параметричного методу врівноваження інженерно-геодезичних мереж порівняно з класичним параметричним методом.

Об'єктом досліджень є деформації інженерних споруд, зокрема напірних трубопроводів гідроелектростанцій.

Предметом досліджень є модифікований параметричний метод врівноваження інженерно-геодезичних мереж ГЕС.

Методи досліджень.

При виконанні робіт за даною тематикою застосовувалися методи лінійної алгебри, математичного аналізу, статистичний метод (метод «Монте-Карло») та методи математичного опрацювання геодезичних спостережень.

Наукова новизна одержаних результатів

На основі математичного моделювання розроблено та запропоновано новий метод врівноваження інженерно-геодезичних мереж, властивостями якого є часткове вилучення систематичних похибок геодезичних вимірів. Запропонований модифікований параметричний метод врівноваження є теоретично обґрунтованим та перевіреном на ефективність порівняно з класичним параметричним методом на основі статистичного моделювання мереж та експериментального вимірювання на тестових полігонах. Отримано та теоретично обґрунтовано вирази для розрахунку точності визначення параметрів деформацій інженерних споруд ГЕС.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблений модифікований параметричний метод врівноваження інженерно-геодезичних мереж порівняно з класичним параметричним методом дає на 10÷50% достовірніші результати. Отримані в роботі вирази дозволяють виконувати розрахунок точності визначення параметрів деформацій інженерних споруд ГЕС.

Основні положення, що виносяться на захист.

- модифікований параметричний метод врівноваження інженерно-геодезичних мереж;
- результати розрахунку точності параметрів деформацій інженерних споруд на прикладі Теремле-Ріцької ГЕС;
- результати дослідження ефективності модифікованого параметричного методу врівноваження інженерно-геодезичних мереж порівняно з класичним параметричним методом;
- результати дослідження деформаційних процесів напірного трубопроводу Теремле-Ріцької ГЕС за допомогою модифікованого параметричного методу врівноваження інженерно-геодезичних мереж.

Особистий внесок здобувача

Основні положення та результати досліджень дисертаційної роботи, які отримано самостійно, опубліковано у працях [134, 136]. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [135] – експериментальне дослідження параметрів деформацій напірного трубопроводу, [143] – формули для визначення оцінки точності параметрів деформацій напірних трубопроводів; розрахунок точності параметрів деформацій напірного трубопроводу Теремле-Ріцької ГЕС, [137] – апробація методики комплексного дослідження деформацій аварійної споруди, [44] – порівняльний аналіз ефективності модифікованого параметричного методу врівноваження на мережах з різною відкритістю горизонту, [142] – апробація ефективності модифікованого параметричного методу врівноваження у мережах з ідеальними умовами видимості супутників, [144] – розроблення модифікованого параметричного методу опрацювання ГНСС-вимірів з метою вилучення систематичних похибок, які виникають при одночасних ГНСС-спостереженнях; апробовано ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження у мережах з обмеженими умовами видимості супутників.

Апробація результатів роботи

Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум – 2011», «Геофорум – 2012» та «Геофорум – 2015» (м. Яворів, м. Львів) – 2011, 2012 та 2015 роки.

Міжнародному науково-технічному симпозиумі “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – ГНСС і GIS-технології” (м. Алушта, Крим) у 2010, 2011 та 2012 роках.

Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні напрямки наукових досліджень у сфері геодезії та картографії», 8-10 грудня 2010 р. Кутно, Польща.

Публікації

За результатами дисертації опубліковано 8 наукових праць [44, 134, 135, 136, 137, 142, 143, 144], 1 стаття у науковому періодичному виданні України, що входить до міжнародних наукометричних баз [144], 4 статті у фахових виданнях з переліку ВАК України [44, 134, 142, 143], 3 статті у збірниках тез наукових конференцій [135, 136, 137].

Структура і обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел (153 найменування). Загальний обсяг дисертації становить 148 сторінок, ілюстрації складають 33 рисунки та 37 таблиць.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ГЕС

Гідроелектростанції займають друге місце з виробництва електроенергії у світі. ГЕС будують таким чином, щоб вода під тиском потрапляла на турбіни, виробляючи електроенергію. ГЕС вважаються найбільш екологічно чистими та безпечними. Однак історія налічує десятки випадків аварій на великих ГЕС, які призвели до величезних руйнувань та численних людських жертв. Це зумовлено деформаційними процесами, які відбуваються з інженерними та гідротехнічними спорудами. Для запобігання зміщень та деформацій необхідно виконувати геодезичний та геофізичний контроль за самими спорудами та прилеглими до ГЕС територіями [135].

1.1 ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ГЕС

Гідроенергетику використовують у всесвітньому масштабі (див. рис. 1.1). Найбільша кількість ГЕС розташована в країнах Південної Америки, Азії, Південної і Центральної Африки, Європи та Канаді. Найбільші ГЕС знаходяться в Китаї, Бразилії, Венесуелі, Канаді, та Росії.

Однак гідропотенціал Землі задіяний лише на 25 %. Це зумовлено тим, що хоч ГЕС і є економічно вигідними в експлуатації та довговічними, але вони потребують безперервного контролю за їх станом, який виконують за допомогою геодезичного деформаційного моніторингу технічного стану особливо небезпечних і технічно складних об'єктів. Такий контроль став необхідним елементом у комплексній системі забезпечення безпечної експлуатації ГЕС.

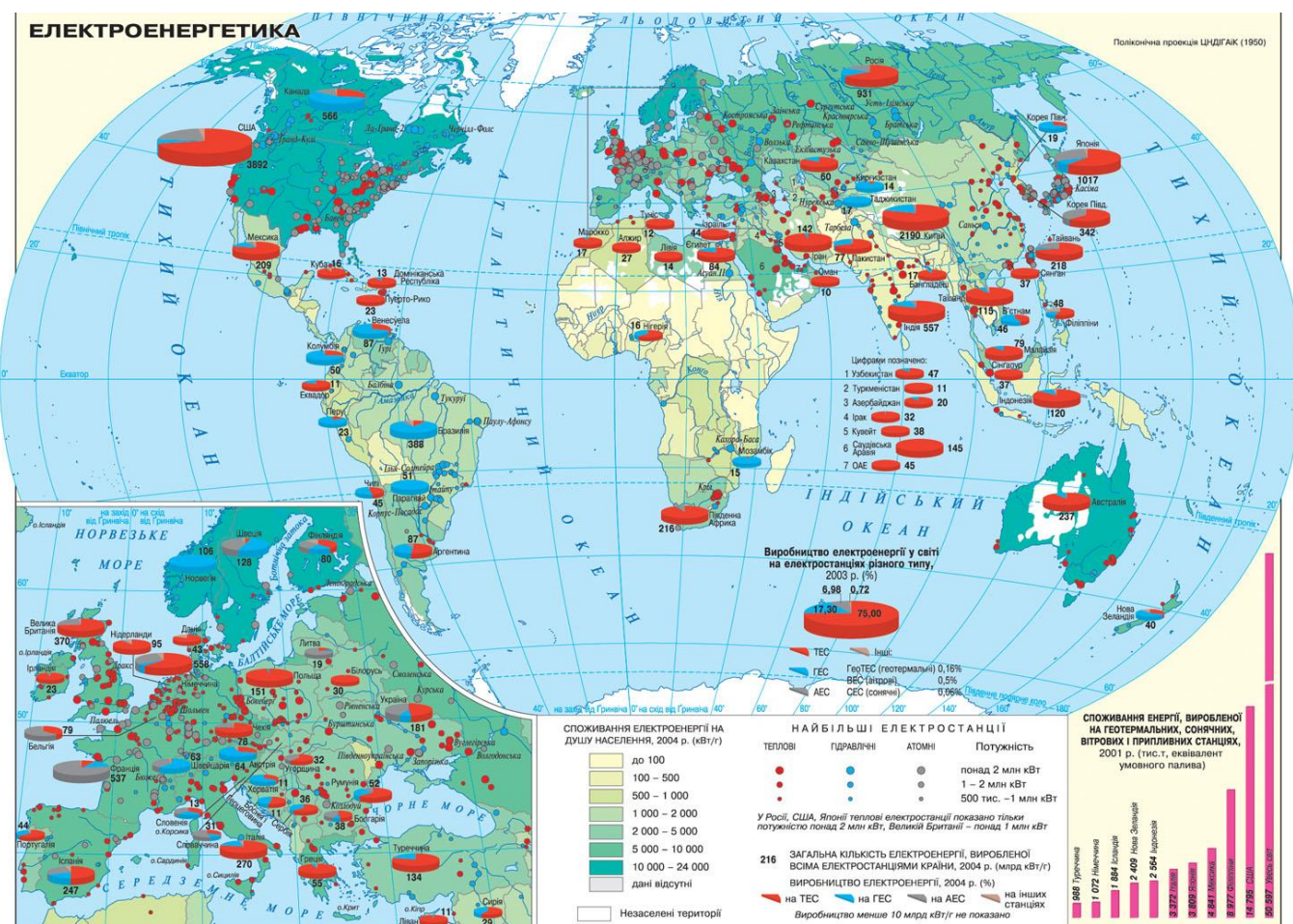


Рис. 1.1 Розподіл виробництва електроенергії в світі [122]

Аварійні ситуації, які виникають на ГЕС, мають надзвичайно великий руйнівний вплив не лише на об'єкти ГЕС, але і на території прилеглі до них. Руйнівна сила не лише знищує інженерні споруди, але і забирає велику кількість людських життів. У XXI ст. найбільшими аваріями на ГЕС були:

- червень 2013 року, Індія – на великих гідроелектростанціях Dhauliganga і Vishnuprayag під час паводків затопило машинні зали. В результаті одна зі станцій вийшла з ладу на 6 місяців, а друга на 1 рік. Для повернення станцій у робочий стан необхідно було провести заміну деякого коштовного обладнання;

- червень 2013 року, Північна Індія, штат Уттаракханд (Гімалаї) – мусонні дощі протягом двох днів переповнювали річки. В результаті паводків були знищені десятки гребель. Загибло майже 6000 осіб, зруйновано 1300 доріг і 25 “малих” гідроелектростанцій, близько 150 мостів. На думку уряду країни, така ситуація склалася не тільки через дощі, а й через те, що греблі були розташовані занадто

близько одна до одної, а це вплинуло на потік річки і посилювало повені. Ці греблі були побудовані на річці без створення водосховищ, буквально одна за одною. В результаті проведення розслідування було з'ясовано, що греблі протягом десятиліть завдають значної шкоди навколишньому середовищу.

- 2009 рік, Індія – через прорив греблі сталася аварія на гідроелектростанції Srisaïlam Dam, що призвело до зупинки роботи ГЕС на 1 рік.

- 2009 рік, Росія – аварія на Саяно-Шушенській ГЕС (одна з найбільших у світі). Внаслідок аварії загинуло 75 чоловік. Станцію повністю запустили в листопаді 2014 року.

- 2005 рік, США – сталася аварія на гідроелектростанції Taum Sïk, обійшлося без жертв. ГЕС призупинила роботу до 2010 року.

- 2000 рік, Швейцарія – через розрив напірного трубопроводу загинуло 3 людини. Було втрачено 1269 МВт генеруючої потужності.

Найбільша аварія в історії ГЕС сталась в Китаї у 1975 році. В результаті руйнування греблі на гідроелектростанції Banqiao було зруйновано ще 62 греблі, від затоплення прилеглих територій загинуло 14 600 чоловік. Ще 145 000 тисяч померло від голоду та епідемій, близько 11 000 000 залишилося бездомними.

Як бачимо, гідроелектростанції є дуже небезпечними спорудами. Найбільшу загрозу становлять греблі, які у надзвичайних умовах не в змозі витримати всю водну міць річки. Особливо, коли відбуваються паводки, адже навантаження на греблю збільшується у десятки разів, і будь-який дефект у конструкції може призвести до катастрофічних наслідків.

Основною метою геодезичного деформаційного моніторингу є визначення зміни геометричних параметрів окремих елементів конструкцій протягом періоду експлуатації об'єкта. Такі дослідження дозволяють передбачати та запобігати небезпечним та аварійним ситуаціям на ГЕС [96]. Виконувати такі дослідження необхідно в режимі «реального часу», адже деформаційні процеси, як в тілі споруди, так і на прилеглих до неї територіях, відбуваються постійно. Відстеження деформаційних процесів потребують високої точності, адже вони є сигналом для попередження надзвичайних ситуацій. Для виконання такого контролю необхідно

визначити причини виникнення деформацій на інженерних спорудах ГЕС та визначити, яку з існуючих систем автоматичного моніторингу за деформаціями необхідно використовувати.

1.2 ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

Дослідження деформаційних процесів вимагає детального визначення причин, що призводять до їх виникнення. Їх в літературі ділять на три типи, а саме:

- ендогенні (геологічна будова, зміни в земній корі, сейсмічна активність);
- екзогенні (вітри, урагани, ерозія ґрунтів, зсуви тощо);
- техногенні (спричинені діяльністю людини: створення водосховищ, штучна зміна рівня води в водоймах, зміна цільового призначення земель, створення кар'єрів та вибухи на них).

Розглянемо детальніше кожний з вказаних факторів.

1.2.1 Ендогенні процеси

Ендогенні процеси – зміни, зумовлені енергетичними джерелами внутрішніх геосфер Землі, які підпорядковані силам, які діють всередині планети, та практично не залежать або дуже мало залежать від зовнішніх впливів. До них відносяться: тектонічні рухи земної кори, що викликають гороутворення [90, 91]; повільні коливання земної кори, що призводять до підняття та опускання окремих її ділянок, які в свою чергу зумовлюють утворюючі або розривні порушення складчастих гірських порід; магматизм, який виражений у вигляді виверження лави на поверхню або застигання її безпосередньо в земній корі. Цей процес зумовлює утворення магматичних порід, які також впливають на виникнення деформаційних процесів. До ендогенних процесів відносять також особливий вид тектонічних рухів – *землетруси* [53, 57, 65, 116].

Територію України оточують сейсмоактивні зони на південному заході і півдні: Закарпатська, Вранча, Кримсько-Чорноморська та Південно-Азовська. Область підземного удару землетрусу викликає пружні коливання (сейсмічні хвилі), що поширюються по землі у всіх напрямках. Землетруси захоплюють великі території та мають руйнівний характер [55, 93, 145].

У сейсмічному відношенні найбільш небезпечними областями в Україні є Закарпатська, Івано-Франківська, Чернівецька, Одеська та Автономна Республіка Крим. На теренах Закарпаття відзначаються осередки землетрусів з інтенсивністю 6-7 балів (за шкалою Ріхтера) у зонах Тячів – Сигет, Мукачево – Свалява. Слід відзначити, що саме на території Закарпаття та безпосередньо Карпат розташована значна частина “малих” ГЕС України (наприклад, Теребле-Ріцька ГЕС). Закарпатська сейсмоактивна зона характеризується проявом землетрусів, що відбуваються у верхній частині земної кори на глибинах 6-12 км з інтенсивністю в епіцентрі 7 балів. Шестибальні землетруси зафіксовані також у Прикарпатті (Буковина). Прикарпаття відчуває вплив від району Вранча (Румунія) [71, 100, 102, 120, 127, 148].

Якщо ж розглядати земну кору в цілому, то вона постійно переміщається, хоча більша частина змін у ній відбувається повільно. Однак наслідки зсуву земної кори носять руйнівний характер [106]. На території України коливальні рухи земної кори відбуваються на Придніпровській височині, яка щорічно піднімається на 9,5 мм, та на північно-східній області Східноєвропейської рівнини, яка опускається на 12 мм/рік [128]. Наслідком розривних та складкоутворюючих рухів земної кори є брилеві та складчасті гірські системи. На території України розташована частина Карпатської гірської складчастої системи, на території якої розташована частина «малих» ГЕС України [79, 97, 117, 151].

1.2.2 Екзогенні процеси

Екзогенні процеси – це процеси, що зумовлюють зміни складу гірських порід, структур, загального вигляду поверхні Землі та відбуваються під впливом енергії, джерелом якої є Сонце, інші планети Сонячної системи і Космос загалом. Основними джерелами енергії екзогенних процесів є: циркуляція води в атмосфері на поверхні та в надрах Землі, безперервне переміщення водних та повітряних мас, хімічне та фізичне перетворення речовини під впливом життєдіяльності організмів, діяльності людини тощо. До найбільш руйнівних слід віднести: селі, ерозію ґрунтів, зсуви, обвали, осипи та метеорологічно-небезпечні явища [111].

Одним із найнебезпечніших і дуже поширених природних явищ є зсуви. Зсув – це зміщення вниз по ухилу під дією сил тяжіння великих ґрунтових мас, що формують схили гір, річок, озерних та морських терас. Відповідно до міжнародної статистики приблизно 80% сучасних зсувів викликані діяльністю людини [87].

Ще одним небезпечним для гірських районів екзогенним процесом є селі. Вони виникають раптово внаслідок різкого підйому води в руслах гірських річок. Причинами виникнення селевих потоків майже завжди бувають сильні зливи, інтенсивне танення снігу та льоду, промивання гребель водойм, а також землетруси та виверження вулканів [99, 73, 82].

Обвали – це відрив і катастрофічне падіння великих мас гірських порід. Обвали природного походження спостерігаються у горах, на берегах морів, урвищах річкових долин. Найчастіше (до 80%) сучасні обвали пов'язані з антропогенним фактором. Осип – це нагромадження щебеню чи ґрунту біля підніжжя схилів. Райони Карпатських та Кримських гір підпадають під дію обвалів та осипів [56, 82, 103, 108, 109, 152].

Внаслідок екзогенних процесів за останні 50 років сталося ряд аварій на ГЕС, які призвели до катастрофічних наслідків. Так в Італії у 1963 році на греблі Вайонт через довготривалі зливи та підняття ґрунтових вод в Альпах стався зсув. Через перелив води через гребінь греблі зміло кілька населених пунктів та загинуло 3200 чоловік [147]. В 1975 році в Китаї через тайфун Ніна прорвало греблю, гігантська хваля зруйнувала 62 греблі та ГЕС, загинуло 26 тис.чоловік [94]. У 1979 році в Індії через атмосферні опади стався прорив греблі. Наслідками аварії стало 15 тис. загиблих та руйнація 60% житлового фонду [110]. Внаслідок повеневих вод у 2004 році прорвало захисну греблю ГЕС Далунтань (Китай), загинуло 20 чоловік та сталися масові руйнування споруд. В Пакистані через потужні зливи в 2005 році прорвало греблю ГЕС Шакидор. Загинуло 130 чоловік та 500 постраждало [92].

1.2.3 Процеси техногенного характеру

У процесі життєдіяльності людства зростають масштаби господарської та промислової діяльності. Щороку збільшується кількість небезпечних речовин, що використовують у виробництві і можуть призвести до надзвичайних ситуацій та техногенних катастроф, таких як: вибухи, пожежі, затоплення або забруднення навколишнього середовища. Всі вони у певній мірі зумовлюють деформаційні процеси та викликають руйнації інженерних споруд ГЕС.

До гідродинамічних аварій, що стаються в Україні, належать:

- прориви гребель (шлюзів) з утворенням хвиль прориву та катастрофічних затоплень або з утворенням проривного паводка;
- аварійні спрацювання водосховищ ГЕС у зв'язку із загрозою прориву гідроспоруди [56, 70, 74, 95].

Створення водосховищ порушує природний хід формування схилів річкових долин – на зміну річковій ерозії приходить хвильова абразія. Інтенсивність переробки залежить від геологічної будови та розмірів водосховища, яке визначає параметри хвиль [82]. Відповідно до цього виникають деформаційні процеси на об'єктах, що розташовані на береговій лінії.

Найбільшу в Україні систему водосховищ, з довжиною берегової лінії 3529 км, утворює Дніпровський каскад. Він охоплює 6 гідроелектростанцій (Київську, Канівську, Кременчуцьку, Середньодніпровську (колишня Дніпродзержинська), Дніпровську та Каховську), що розташовані на шести водосховищах річки Дніпро (див. рис. 1.2).



Рис. 1.2 Каскад Дніпровських ГЕС [84]

Середня ширина смуги переробки (порушення природніх схилів річкових долин) спостерігається на ерозійних берегах Дніпродзержинського водосховища – 68м, середня швидкість переробки - 3,2 м/рік (у районі с. Дніпровське швидкість переробки - 5,6 м/рік, ширина абразійно-обвального берегу - 117,9 м). Максимальні швидкості зміни берегів каскаду Дніпровських водосховищ відзначались у перші 5-10 років їх існування, коли береги, що склались з пухких порід, відступали на 50-100 м/рік. На сьогоднішній день середня швидкість не перевищує 5 м/рік, максимальна (на окремих ділянках) сягає 20-30 м/рік. Довжина ділянки зміненого берега на Київському водосховищі становить 50 км, на Канівському – 45 км. Швидкість зміни берегової лінії Київського водосховища в середньому становить 8-10м/рік, Канівського – 6-7м/рік [70, 81, 82, 88].

Вивчення стану наявних гребель у різних країнах світу показує, що вони не бувають абсолютно надійними. За статистичними даними в середньому на 15 тис. великих гідроспоруд припадає 1,5 аварії на рік [31]. Ще однією причиною деформаційних процесів техногенного характеру, окрім створення штучних водосховищ, є недбалість обслуговуючого персоналу ГЕС. Так у 1977 році в Техасі (США) прорвало греблю ГЕС, наслідком чого стало 40 загиблих та затоплені прилеглі до ГЕС території [139]. У 2009 році в Росії сталась одна з найбільших гідроенергетичних аварій [139]. В результаті аварії на Саяно-Шушенській ГЕС загинуло 75 людей, зруйновано гідроагрегати та стіни, без електропостачання залишилося декілька алюмінієвих та феросплавних заводів і частина населення Сибіру. Економічні збитки аварії оцінюють 1 млрд євро [139].

Розглянувши ендегенні, екзогенні та техногенні причини виникнення деформацій споруд, можна стверджувати, що найбільший вплив мають саме техногенні. Вони є найбільш небезпечні, адже створення штучних водосховищ не тільки затоплює сотні тисяч гектарів землі, але й порушує водний баланс планети в цілому. Така діяльність людини призводить до зміни русел річок, що в свою чергу викликають ендегенні та екзогенні явища, які призводять до надзвичайних ситуацій, тому необхідно спостерігати за станом інженерних споруд ГЕС, які знаходяться в безпосередній близькості до водосховищ.

1.3 КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ОСІДАНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ СПОРУД

Розглянувши причини виникнення деформацій інженерних споруд, їх виміри можна поділити на дві самостійні групи [62].

До першої групи входять: дослідження фізико-механічних властивостей ґрунтів основи, виміри тиску під подошвою фундаменту, виміри температури фундаменту, коливання рівня ґрунтових вод і т.д. Всі ці види вимірів можна об'єднати під спільною назвою – «фізико-механічний нагляд».

До другої групи входять власне виміри осідань і деформацій споруд. Ці виміри проводяться як класичними геодезичними, так і іншими методами.

Зрозуміло, що результати вимірів цих двох груп мусять розглядатися разом.

Виміри осідань і деформацій інженерних споруд можна поділити на дві підгрупи:

1. Всі виміри, що зв'язані із встановленням приладів безпосередньо на споруді чи в середині неї, при цьому прилади будуть самі пересуватися разом із спорудою і вказувати величину відносного осідання чи деформації. Сюди можна віднести виміри з допомогою різноманітних маятників, інкліномірів, деформометрів, щілиномірів та інших чутливих приладів.

2. Всі виміри, з допомогою яких визначають величини вертикальних і горизонтальних абсолютних зміщень споруд по відношенню до точок, розташованих на деякій відстані від них, і які вважаються практично нерухомими. Сюди можна віднести всі основні методи геодезичних вимірів, а саме:

а) геометричне нівелювання – застосовують для визначення вертикальних зміщень значної кількості доступних точок споруди;

б) гідростатичне нівелювання, яке застосовують для одночасного визначення вертикального зсуву ряду закритих важкодоступних точок споруд, розташованих приблизно на одному рівні;

в) лінійно-кутові виміри – використовують для визначення вертикальних і горизонтальних зміщень відкритих важкодоступних точок;

г) створний метод для нагляду за зсувом споруд;

д) ГНСС-виміри – застосовують для моніторингу горизонтальних та вертикальних деформацій точок на відкритих територіях та висотних спорудах.

е) фотограмметричний і стереофотограмметричний метод використовують для визначення зміщення точок споруд в плані та просторі.

Такий поділ методів спостережень має велике значення, тому що результати вимірів першої підгрупи характеризуються зміщенням одних частин споруди відносно інших, а геодезичні виміри характеризують величину і напрям зміщення споруди відносно нерухомих точок – знаків геодезичної основи. Сучасні методи вимірів і врівноважень їх результатів дають також можливість до певної міри

контролювати і виявляти елементи зсуву геодезичної основи, як вихідних даних [67, 89, 121, 124, 130].

У таблиці 1.1 наведено сучасні методи дослідження деформацій та об'єкти, на яких вони найчастіше застосовуються [134, 138].

Таблиця 1.1

Об'єкти та методи дослідження деформацій

Назва методу	Сфера застосування
Високоточне нівелювання	Дослідження деформації фундаменту споруд
ГНСС виміри	Дослідження деформації інженерних споруд та дамб ГЕС
Лінійно-кутові вимірювання	Визначення осідань та деформацій споруд різних типів
Наземне лазерне сканування	Визначення кренів споруд
Нахиломіри	Контроль нахилу споруд
Виміри датчиками розкриття тріщин	Контроль за розкриттям тріщин в режимі реального часу
Стереофотограмметричний	Визначення деформацій фасадів споруд

Методи, подані в таблиці 1.1, базуються на отриманні вимірів за допомогою різних геодезичних приладів. Розглянемо приклади використання основних геодезичних методів дослідження деформацій інженерних споруд.

Метод високоточного нівелювання застосовувався під час контролю вертикальних зміщень об'єктів Рибінської та Углічської ГЕС (Росія) [85]. У загальному на спорудах каскаду Верхньоволжських ГЕС закладено 217 марок. Таке розташування марок дає можливість отримати повну інформацію про стан споруд та прогнозувати напрямок та інтенсивність їх деформацій. Нівелювання виконувалось щорічно в декілька етапів цифровим нівеліром DNA03. На основі отриманої

інформації визначали деформаційні процеси, які відбуваються з інженерними спорудами зазначених ГЕС та виконували ремонтні роботи [85].

Ще одна технологія моніторингу деформацій споруд наведена у роботі [149]. Описаний метод полягає у високоточному нівелюванні марок, які розташовані по периметру фундаменту споруд. На основі різниці відміток марок проводять аналіз абсолютних величин деформацій і швидкості їх зміни. Слід зауважити, що для визначення швидкості зміни деформації такі дослідження необхідно проводити періодично протягом тривалого часу.

Визначення кренів інженерних споруд методом наземного лазерного сканування розглянуто у роботі [66]. З технологічної точки зору метод лазерного сканування значно швидший і простіший порівняно з іншими способами дослідження деформацій. Основна частина даного методу полягає в камеральній обробці, що є громіздкою процедурою. У процесі опрацювання вимірів зі всієї хмари точок необхідно виділити досліджуваний об'єкт та розділити його на графічні примітиви, адже в автоматичному режимі побудувати 3D модель споруди складної форми неможливо. Автори [36] виконували дослідження для споруди прямокутної форми, що значно спростило процес обробки даних та скоротило час на визначення необхідних параметрів досліджуваного об'єкту порівняно з іншими геодезичними методами. Однак слід зауважити, що для об'єкту складної геометричної форми процес досліджень буде тривати в декілька разів довше, а в деяких випадках взагалі є неефективним.

Якщо ж розглядати застосування виключно інклінометрів, то воно є доцільним для дослідження протяжного об'єкта цілісно [153]. Інклінометри серії NIVEL швейцарської фірми Leica дозволяють створити вимірювальну мережу, яка складається з 32 приладів, що дозволяє охопити велику площу об'єкту спостереження. Крім того, простота команд дозволяє створити власні програмні модулі для опрацювання результатів спостережень при вирішенні конкретних геодезичних задач. Використання виключно інклінометра дозволяє визначити лише напрямок та швидкість деформації споруди, однак якщо ж, наприклад, поєднати

його з мережею ГНСС-приймачів на інших спорудах, то можливо отримати цілісну картину поведінки об'єкта.

Метод лінійно-кутових вимірів використовувався для дослідження деформацій інженерних споруд на території греблі Ямула (Туреччина) [1]. З цією метою було створено інженерно-геодезичну мережу на території греблі, яка б задовольняла точність, необхідну для дослідження деформаційних процесів. Однак слід зауважити, що спостереження за об'єктами виконувалися циклами протягом півтора року, що потребувало великих матеріальних затрат.

Об'єктом досліджень роботи [54] є саркофаг Чорнобильської АЕС. Спостереження за деформаціями споруди проводяться з 1987 року. Визначають вертикальні зміщення (осідання) контрольних марок, закладених у цокольній частині споруд, методом повторного прецизійного геометричного нівелювання, а горизонтальних і вертикальних зміщень марок верхніх ярусів та покрівель – методом повторних визначень їх просторового положення прямими кутковими засічками і тригонометричним нівелюванням. Детально описана швидкість та напрямок деформації саркофага. Виконаний аналіз та порівняння результатів вимірів за великий проміжок часу, що дозволив встановити максимальне осідання (40 мм) і горизонтальне зміщення (20 мм).

У роботі [83] наведений комплекс натурних спостережень за станом гідростатичних споруд Саяно-Шушенської ГЕС. Автори показали результати контролю за станом споруди під час експлуатації та в період виконання ремонтних робіт. Спостереження виконувалися різноманітними сучасними геодезичними методами: гідростатичне нівелювання, геометричне нівелювання, лінійно-кутові виміри тощо. Особлива увага зосереджена на впливі гідростатичних навантажень і температурного фактора та їх вплив на стан споруди, які необхідно враховувати під час виконання геодезичних робіт.

На використанні класичних методів дослідження деформацій акцентує увагу автор в роботі [126]. Проводить порівняльний аналіз та виділяє особливості опрацювання результатів довгоперіодичних спостережень. Наведено аналіз результатів досліджень деформацій мостового переходу в Берліні. Деформації

досліджувалися методами високоточного нівелювання і лінійно-кутового вимірювання мережі спеціальних пунктів, які закріплені на опорах моста і в зоні, позбавленій деформації [34]. Крім цих вимірів вирішили виконати неперервні добові виміри електронним роботизованим тахеометром і інклінометром. З отриманих результатів можна зробити висновок, що запропонована методика поєднання декількох методів спостережень дозволила детально дослідити характер деформацій цієї споруди.

Слід звернути увагу на складність обробки цих даних, адже необхідно опрацьовувати сотні тисяч вимірів, що є достатньо складною задачею, яка вимагає висококваліфікованих спеціалістів зі знаннями не тільки геодезії, але й математики.

У роботі [61] розглядають основні причини виникнення деформацій споруд та необхідність виконання періодичного моніторингу за станом споруд у зв'язку із збільшенням кількості аварій. Виділені найбільш перспективні, на думку авторів, методи моніторингу, а саме: моніторинг конструкцій за допомогою оптико-електронних систем, геодезичний моніторинг з використанням електронних тахеометрів, використання лазерного сканера під час фотограмметричних методів вимірювання, геодезичний моніторинг методом супутникової геодезії з використанням системи навігації ГНСС, метод фотофіксації дефектів, моніторинг із застосуванням динамічних методів випробувань, відеогідростатичний моніторинг. Представлений опис даних методів та умови їх використання, однак автори не класифікували їх за точністю та радіусом застосування.

Виконавши аналіз класичних методів визначення деформацій інженерних споруд нами було розроблено класифікатор методів залежно від інструментальної точності і радіусу дії (див. рис. 1.3).

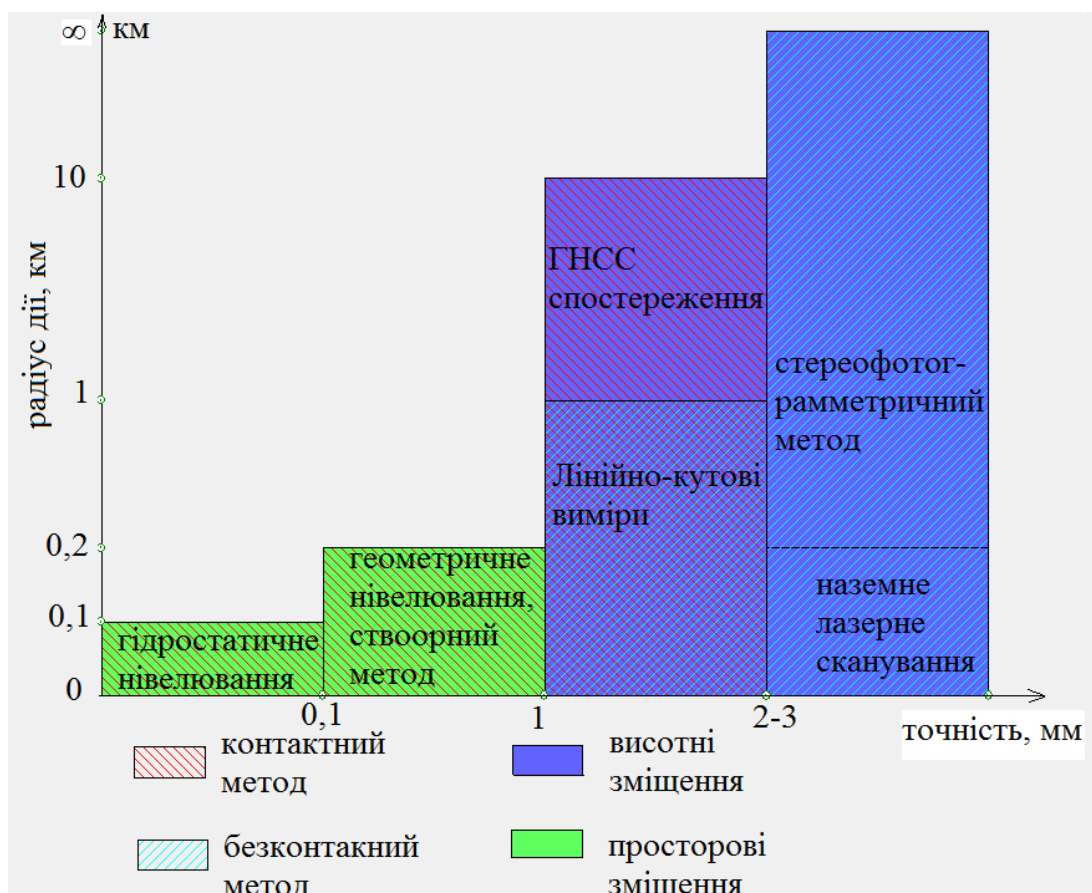


Рис. 1.3 Класифікатор методів визначення деформацій інженерних споруд.

Слід зауважити, що класичні методи дослідження деформацій споруд зі збільшенням радіусу дії втрачають точність отриманих результатів, тому необхідно дослідити комплексні методи, які б поєднали у собі декілька методів.

Одним з таких комбінованих методів моніторингу за деформаціями висотних споруд є метод, що базується на даних ГНСС-вимірів та поєднанні їх з вимірами акселерометра [48]. Наглядним прикладом ефективності такого методу є дослідження проведені на даху хмарочоса «Yokohama Island Tower» у місті Токіо (Японія) [12, 19]. ГНСС-приймач та акселерометр були встановлені на даху споруди та працювали в безперервному режимі. На рис.1.4 зображено розміщення приладів на об'єкті.



Рис.1.4 Встановлений ГНСС приймач та акселерометр

Отримані дані були опрацьовані сумісно. З результатів опрацювання спостережень можна зробити висновок, що виміри ГНСС добре узгоджуються з вимірами акселерометра. Отже, їх комбінація ефективна при дослідженні хмарочосів, однак слід зауважити, що ГНСС-виміри містили в собі ряд похибок, адже відстань між парою приладів становила 34 км.

Ще одним досліджуваним хмарочосом є вежа Комтар у Малайзії [46]. У процесі дослідження деформацій використовували мережу з 6-ти ГНСС-станцій: 4 – на даху споруди і 2 – на площі перед будівлею. Використані дані лише двох циклів спостережень, що є недостатнім для проведення достовірних висновків стосовно поведінки споруди та ще раз вказує на необхідність проведення довготривалих періодичних або безперервних спостережень.

Прикладом доцільності такого комплексного дослідження є спостереження за деформаціями греблі Кабріл (Португалія) [18, 22]. На території греблі виконували щорічні цикли спостережень за допомогою ГНСС та лінійно-кутових методів. При виконанні нового циклу спостережень на верхній галереї греблі було встановлено інклінометр, який працював впродовж двох днів. Аналіз отриманих результатів довів кореляцію між рухами тіла греблі і щоденними коливаннями рівня води у водосховищі.

Використання та поєднання геодезичних методів визначення деформацій споруд дозволяють відслідковувати їх, однак сучасні геодезичні прилади дозволяють також встановлювати мережі короткострокового та довгострокового автоматизованого

моніторингу зміщень. На сьогодні в Україні такі системи моніторингу використовують на декількох ГЕС Дніпровського каскаду (Дніпровській, Канівській, Середньодніпровській (колишня Дніпродзержинська) та впроваджують в експлуатації на інших «великих» ГЕС України. В Європі такі системи моніторингу вже отримали широке застосування [1, 32, 33, 42].

Системи автоматизованого моніторингу дозволяють скоротити час на проведення досліджень за деформаціями у 5-8 разів порівняно з традиційними ручними геодезичними методами [105]. Окрім оперативності отримання та опрацювання даних ці системи підвищують точність отриманих результатів. Наприклад для «Донбас-Арени» точність визначення положення контрольних точок становить ± 1 мм, а для футбольного стадіону у Греції ± 3 мм [25].

Розглянемо детальніше сучасні системи автоматизованого моніторингу за деформаціями об'єктів ГЕС. На сьогоднішній день лідерами в розробці та експлуатації таких систем є ряд компаній з виробництва геодезичних приладів (Trimble, Leica Geosystems AG), деякі високотехнологічні компанії, що створюють комплекси для керування інформацією (АО «Банкомсвязь») і компанії, що спеціалізуються саме на моніторингу цілісного стану споруд (SolDATA Group).

Автоматизовані системи моніторингу та контролю за станом споруд, призначені для автоматичного вимірювання параметрів, що характеризують стан споруд (мостів, тунелів, гребель, висотних будівель і т.п.), обробки і візуалізації результатів цих вимірювань. Технічний стан споруд оцінюють у період будівництва та експлуатації на основі результатів візуальних спостережень і вимірювань, отриманих за допомогою контрольно-вимірювальної апаратури [140].

Автоматизовані системи моніторингу стану споруд – це складна, повністю автоматизована, багаторівнева, ієрархічна система, яка складається з наступних рівнів:

- збір у режимі реального часу інформації з геодезичних, геотехнічних та метрологічних приладів;
- архівація та передача на центральний сервер результатів, отриманих з контрольно-вимірювальної апаратури;

- опрацювання отриманих результатів вимірів та їх подання у графічному та табличному виглядах;
- автоматичне порівняння показників датчиків з гранично допустимими та сигналізація про їх перевищення.

Кожна з вище зазначених компаній має свою розроблену та апробовану систему моніторингу. Корпорація Trimble створила систему Trimble 4D Control, яку використовують на різних об'єктах господарювання по цілому світі (міст Pitt River Bridge, Ванкувер, Британська Колумбія, Канада; гребля Tolt Dam, Сіетл, США; вугільна шахта Mae Moh, Тайланд; стадіон Green Point, Кейптаун, Південна Африка; шлюзи Miraflores и Gatun, Панамський канал; гребля Borinquen Dam, Панама та інші [101]). Система складається з програмного забезпечення, високоточних геодезичних приладів (тахеометри, ГНСС-приймачі та контролери), датчиків (температурні, барометричні, піезометричні і т. д.), пристроїв комунікації і різноманітних аксесуарів [69, 107].

Фірма Leica Geosystems AG створила автоматизовану систему моніторингу Leica GeoMoS, яка також отримала широке застосування. Вона складається з інструментальної (приладової) складової та програмного забезпечення. Програмне забезпечення Leica GeoMoS містить два основні додатки – Монітор (Monitor) і Аналізатор (Analyzer) та програмного розширення Leica GeoMoS – Врівноваження (Adjustment), яке дозволяє користувачеві приймати рішення, обґрунтовані на статистично оптимізованих і вивірених даних [28]. Окрім програмної складової система обладнана високоточними геодезичними, геотехнічними і геофізичними приладами, які дозволяють отримувати необхідні для аналізу і прогнозування деформацій виміри.

Leica GeoMoS також широко застосовується для дослідження деформаційних процесів на різноманітних об'єктах. Під час будівництва найвищого житлового хмарочосу Європи ("The Shard" в Лондоні, Великобританія) система Leica GeoMoS виконувала спостереження за опалубкою споруди 24 години в добу [48]. Таке дослідження дозволило відслідковувати та оперативно реагувати на будь-які зміни, що відбувалися під час будівництва. За допомогою модифікованої версії Leica

GeoMoS використовувалася під час Башни Бурдж Халифа (Burj Khalifa) в Дубаї, Аль Хамра (Al Hamra) в Кувейті та Лендмарк (Landmark tower) в Абу Дабі [45]. Система будівельного контролю Core Wall Control Survey System має перевагою те, що вона дозволяє визначити вертикальність споруди незалежно від впливу зовнішніх умов (вітер, тиск тощо). Система складається з ГНСС-приймачів, тахеометрів, інклінометрів, датчиків та програмного забезпечення. Особливість розташування обладнання під час будівництва вищезазначених споруд дозволило не створювати геодезичної мережі навколо об'єктів. Ще одним застосуванням Leica GeoMoS є контроль за деформаціями ґрунтових порід [27]. Такі роботи виконувалися під час контролю шахт з видобутку золота у Ганні. Особливістю рудовищ є те що вони розташовані у вулканічному поясі. Таким чином деформаційні рухи відбуваються постійно, тому контроль за ними необхідно виконувати постійно.

Спрощену систему автоматизованого моніторингу за деформаціями застосовували під час будівництва третього моста через Босфор [3]. Використання цієї системи дозволило виконувати високоточний геодезичний контроль будівництва моста.

Ще одним прикладом використання системи Leica GeoMoS є контроль деформаційних процесів під час реконструкції станції метро Педдінгтон (Paddington, Лондон, Великобританія) та спорудження під нею нової станції Кросреїл-Педдінгтон (Crossrail-Paddington), яка входить у перелік семи запланованих станцій метрополітену [9]. Особливістю геодезичних робіт на цій станції є те, що станція працювала під час виконання всіх будівельних робіт, розташування її в самому історичному центрі столиці Великобританії, де знаходиться велика кількість історичних пам'яток і складна система підземних комунікацій. Враховуючи вищезазначені умови, для наземного та підземного контролю використовували 52 роботизованих тахеометри Leica TM-30 та 1800 моніторингових марок. Спостереження виконувалися безперервно упродовж усього періоду будівельних робіт та відслідковували деформаційні процеси у режимі реального часу. Такий геодезичний супровід дозволив оперативно координувати роботу будівельних

бригад, оперативно реагувати на надзвичайні ситуації та виконувати роботу безперебійно.

Окрім вищезазначених об'єктів система Leica GeoMoS використовували також при дослідженні деформацій на таких спорудах, як Kiel Canal (Німеччина), хмарочос Боу, історична частина міста Сан-Фрателло (Італія), міст в Швейцарії, вокзал в Торонто (Канада), гірський хребет поблизу Тоссину (Швейцарія) тощо [29, 34, 38, 41, 50].

Корпорація Trimble і фірма Leica Geosystems AG є одними з найбільших виробників геодезичних приладів у світі, їхні автоматизовані системи моніторингу використовують високоточні прилади їхнього ж виробництва.

Також одним з розробників автоматизованих систем моніторингу є компанія SolDATA Group. Розробники і програмісти цієї фірми створили свою систему моніторингу, яка називається «Циклоп» та її розширення «Кентавр». Система «Циклоп» в режимі реального часу безперервно виконує геодезичні вимірювання на спеціальних геодезичних знаках (оптичні мініпризми), встановлених на конструкціях об'єкта, що спостерігається, після чого комплекс програмних засобів забезпечує в автоматичному режимі збір, первинний аналіз і опрацювання даних вимірів і передає їх для візуалізації в режимі реального часу з використанням програмного забезпечення Geoscore [50]. Систему «Циклоп» використовували: у період виконання реконструкції розв'язки на Поштовій площі в Києві; під час реконструкції та реставрації східного крила Головного Штабу Державного Ермітажу (Росія); після аварії житлового будинку та підпірної стінки по Червонозоряному проспекту, 14 в Києві тощо [50, 52]. Особливістю системи «Циклоп» є те, що вона використовує для дослідження деформаційних процесів споруд дані, отримані лише з високоточних роботизованих тахеометрів, і не використовує геофізичні та геотехнічні датчики. Слід зазначити, що такі дослідження не відображають деформаційні процеси у повній мірі.

Існує ще одна автоматизована система контролю стану споруд – «Титан», розроблена фахівцями АТ «Банкомзв'язок». Система, призначена для автоматичного вимірювання параметрів деформацій, що характеризують стан споруд, опрацювання результатів обмірів та швидкого реагування. «Титан» використовує повний спектр

геодезичного, геотехнічного, геофізичного та метрологічного обладнання. Ця система знайшла широке застосування під час досліджень стану та деформаційних процесів ГЕС України. Вона вже працює на п'яти найбільших ГЕС України (Дніпровській, Канівській, Середньодніпровській (колишня Дніпродзержинська), Дністровській ГЕС та ГАЕС) та в стадії впровадження на Каховській ГЕС [121].

Окрім розроблених комплексних автоматизованих моніторингових систем різні науково-дослідні інститути та геодезичні фірми використовують їх модифікації. У переважній більшості використовується лише приладова база вищезазначених систем, а програмне забезпечення користувачі розробляють самі або модифікують вже існуюче відповідно до конкретних задач. Прикладом такої практики може бути «Інженіринговий центр ГФК» [125]. Працівники цього центру використовують лінійку високоточних тахеометрів, ГНСС-приймачів та нахиломірів фірми Leica. Програмне забезпечення для їх системи слугує модифікація Leica GeoMoS та розроблені ними додаткові модулі. Розроблена ними автоматизована система використовується для досліджень деформацій на греблях Бурейської, Саяно-Шушенської, Богучанської, Красноярської ГЕС. Також під час геодезичного супроводу будівництва мосту через Золотий Ріг у Владивостоці та Великого Обухівського мосту в Санкт-Петербурзі, реконструкції Льодового палацу в Москві та під час створення геодезичної основи для Московської міської системи координат.

Основними перевагами автоматичних моніторингових систем є оперативність, можливість отримання даних цілодобово 7 днів на тиждень та системи сповіщення про можливість аварії або надзвичайної ситуації. Також опрацювання результатів спостережень в режимі реального часу дозволяє координувати роботу будівельників та реставраторів безперервно.

Порівнявши використання лише основних методів дослідження деформацій інженерних споруд з їх комбінацією, можна стверджувати, що застосування комплексних моніторингових досліджень дозволяє значно скоротити часові, трудові та економічні затрати на проведення деформаційних спостережень, а також побачити деформаційні зміни більш точно. Отримання результатів спостережень в реальному часі дозволяє також прогнозувати аварії на об'єктах та запобігати їм.

Дослідження деформацій інженерних споруд вимагає високої точності отриманих результатів, тому вимірювання виконують за допомогою високоточних геодезичних приладів. Інструментально підвищувати точність вимірів проблематично, тому необхідно підвищувати точність математичного опрацювання результатів вимірів, їх надійність та усувати вплив похибок вимірювань.

1.4 МЕТОДИ ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК

Сучасні методи моніторингу за деформаціями використовують найсучасніші та найточніші геодезичні прилади, тому підвищувати точність отриманих результатів можливо лише за рахунок зменшення впливу похибок у процесі опрацювання результатів спостережень. Похибки геодезичних спостережень поділяють на випадкові, грубі та систематичні.

Загалом випадкові похибки слід розглядати, як похибки, абсолютне значення яких у процесі вимірювання довільної величини змінюється без жодної закономірності [114]. Особливість випадкової похибки полягає у тому, що вона змінюється випадково при повторних визначеннях однієї й тієї ж величини. Їх можна усунути за допомогою збільшення кількості вимірів.

Грубі похибки – це такі похибки, які виникають у більшості випадків через неуважність спостерігача. Їх визначають та усувають за допомогою повторних контрольних вимірів.

Систематичні похибки – це похибки, які виникають у результатах вимірювань за певним законом, залежно від факторів, що їх зумовлюють. Існуючі методи опрацювання результатів спостережень дозволяють усунути вплив випадкових та грубих похибок, але не усувають систематичні. Ось чому так важливо дослідити існуючі методи зменшення їх впливу на результати геодезичних спостережень.

Систематичні похибки в літературі прийнято класифікувати залежно від причин їх виникнення, а також згідно з характером їх прояву під час вимірювань [86]. Залежно від причин виникнення систематичні похибки поділяють на:

1. Похибки методу або теоретичні похибки;
2. Інструментальні похибки;

3. Похибки викликані неправильним встановленням і взаємним розташуванням вимірювальних приладів;
4. Похибки спостерігача.

Похибки методу виникають, якщо недостатньо чи помилково розроблена теорія методики ведення спостережень або виконується за її спрощеною методикою. Інструментальні похибки залежать від точності самих вимірювальних приладів. До них також відносять похибки, що виникають внаслідок недосконалості програми ведення спостережень. До похибок, викликаних неправильним встановленням і взаємним розташуванням вимірювальних приладів, відносять невідповідність їх характеристик, атмосферні явища, перебої у живленні приладів тощо. Похибки спостерігача залежать безпосередньо від самого геодезиста, який виконує спостереження. Вони можуть бути викликані, наприклад, дефектами зору спостерігача.

За характером прояву систематичні похибки поділяють на сталі та перемінні. Сталі похибки виникають внаслідок направильного юстування та перевірок приладів і залишаються незмінними впродовж всіх сесій повторних спостережень, тому їх дуже важко виявити в результатах спостережень [86, 131].

Змінні систематичні похибки в свою чергу поділяють на прогресуючі та періодичні. В решті випадків систематичні похибки відносять до похибок, що змінюються за складним законом.

У теорії математичного опрацювання геодезичних спостережень вважають, що систематичні похибки виявляються та усуваються з результатів спостережень. Однак насправді систематичні похибки усунути повністю неможливо. Завжди залишаються деякі фактори, що не були виключені, і їх необхідно враховувати. Для зменшення впливу систематичних похибок необхідно розробляти спеціальні програми спостережень та методи математичного опрацювання результатів вимірів, що дозволяли б зменшувати їх вплив.

У теорії похибок є ряд методів, які дозволяють зменшити вплив систематичних похибок. До таких методів відносять метод усунення джерела похибок, метод заміщення, метод компенсації похибок, метод введення поправок, метод

протиставлення, метод рандомізації, метод симетричних спостережень, графічний метод [80, 131, 132].

Метод усунення джерела похибок ґрунтується на виключенні безпосередньо причин виникнення похибок до початку виконання вимірів.

Метод заміщення забезпечує найбільш повну компенсацію сталої систематичної похибки. Суть даного методу полягає в такій заміні вимірюваної величини відомою величиною, отриманою за допомогою регульованої одиниці виміру, щоб показ вимірювального приладу зберігся незмінним. Значення вимірюваної величини зчитують у цьому випадку за вказівником одиниці виміру. При використанні даного методу похибку неточного вимірювального приладу усувають, а похибку вимірювання визначають тільки похибкою самої одиниці виміру та похибкою відліку вимірюваної величини за вказівником виміру. Такий метод частково усуває вплив систематики на результати спостережень, але не вилучає її повністю, оскільки залишається в самій одиниці виміру.

Метод компенсації похибки за знаком використовують для усунення постійної систематичної похибки, у якій залежно від умов вимірювання змінюється тільки знак. У цьому методі виконують два вимірювання, середнє значення з отриманих результатів є остаточним результатом вимірювання, який не містить похибки. Однак такий метод можливо застосовувати лише при повторних вимірах однієї величини.

Метод введення поправок дозволяє обчислити і зменшити вплив систематичних похибок на результати вимірів. Поправки визначають експериментально або шляхом спеціальних теоретичних досліджень і задають у вигляді формул, графіків, таблиць.

Метод протиставлення застосовують для зменшення сталих систематичних похибок під час порівняння вимірюваної величини з відомою величиною приблизно рівного значення та відтворюється відповідною еталонною величиною. Даний метод є різновидом методу порівняння, при якому виміри виконують двічі і здійснюються так, щоб в обох випадках причини виникнення сталої похибки були різні, але відомі за закономірностями впливу на результати спостережень.

Метод рандомізації базується на принципі формального трактування систематичних похибок як випадкових. Цей метод дозволяє ефективно зменшувати

сталу систематичну похибку (методичну та інструментальну) шляхом вимірювання деякої величини однотипними приладами з подальшою оцінкою результату вимірювань у вигляді математичного сподівання (середнього арифметичного значення) виконаного ряду спостережень. У даному методі при опрацюванні результатів вимірювань використовують випадкові зміни похибки від приладу до приладу.

Метод симетричних спостережень вельми ефективний при виявленні і для виключення систематичної похибки, яка є лінійною функцією відповідного аргументу (амплітуди, напруги, часу, температури і т. д.).

Графічний метод є найбільш простим методом, його використовують для виявлення змінної систематичної похибки в ряді результатів спостережень. При цьому методі рекомендується побудувати графік, на який нанесені результати спостережень у тій послідовності, в якій вони були отримані. На графіку через точки спостережень проводять плавну лінію, яка виражає тенденцію результату вимірювання, якщо вона існує. Якщо тенденція не простежується, то змінну систематичну похибку вважають практично відсутньою.

Запропоновані методи вилучення систематичних похибок з результатів спостережень найчастіше використовують при виконанні повторних вимірів однієї і тієї самої величини, однак їх використання не завжди можливе при опрацюванні геодезичних вимірів.

Окрім вищезазначених методів зменшення впливу систематичних похибок у теорії математичного опрацювання результатів геодезичних спостережень розробляють також додаткові математичні методи. Загальні похибки результатів рівноточних вимірів однієї і тієї ж величини можна представити у вигляді суми двох частин: $\varepsilon_i = \Delta_i + c_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), а систематичні частини c_i розглядають, як реалізація деякої випадкової величини c , для якої математичне сподівання $E(c) = \bar{c}$, яке не дорівнює нулю Боhm [6]. В подальшому введемо поняття:

- загальна середня квадратична похибка $\bar{m} = \sqrt{E(\varepsilon^2)}$,
- випадкова середня квадратична похибка $\bar{\eta} = \sqrt{E(\Delta^2)}$,

- систематична середня квадратична похибка $\overline{m}_c = \sqrt{E(c^2)}$.

Для них записують залежність $\overline{m^2} = \overline{\eta^2} + \overline{m_c^2}$. Відзначимо, що $\overline{m^2}$ – це не дисперсія похибки результатів вимірювань, адже $E(c) \neq 0$, тому для знаходження граничної похибки та розрахунку ваги результату виміру цю величину, в звичайному порядку, використовувати не можна.

Описана модель у подальшому використовується для результатів вимірів, які розділені на декілька груп. Таке застосування призводить до побудови критерія перевірки гіпотези нерівності середніх групових систематичних похибок. Отримані результати узагальнюють на випадок нерівноточних вимірів однієї і тієї самої величини.

У роботі [7] Vohm розширює модель елементарних похибок Хагена, ввівши до неї постійну систематичну похибку, яку визначають стохастичною границею $\lim_{n \rightarrow \infty} st \frac{|\varepsilon|}{n} = c$, де ε_i – загальні похибки рівноточних результатів вимірів. У праці [5] Vohm на основі вивчення рядів Бернуллі, Пуассона і Лексіса будує математичну модель впливу систематичних похибок на дисперсію, однак її застосування вимагає складних математичних перетворень.

Нікіфоров і Рихлюк [112] трактують вплив систематичних і випадкових похибок, як і Vohm, розглядаючи систематичні похибки, як випадкову величину з нульовим сподіванням. Для граничної похибки вони запропонували формулу $\Delta_{np} = |c| + h\sigma_\delta$, де c – математичне сподівання систематичної похибки, σ_δ – стандарт випадкової похибки, h – деяка функція від співвідношення c/σ_δ і рівня значущості. Такої самої думки були Гайдаєв та Большаков [68], які вважали систематичну похибку випадковою величиною з нульовим математичним сподіванням.

Ще одним методом визначення впливу систематичних похибок є дисперсійний аналіз. Хаїмов [150] використав дисперсійний однофакторний аналіз, застосувавши його до нев'язок трикутників триангуляції. Він згрупував їх за територіальними ознаками за інструментарієм, за спостереженнями тощо. Відуєв і Кондри [64] в своїх публікаціях запропонували використовувати саме дисперсійний аналіз, що включає дво- та тривірневі рівневі моделі, а також запропонували використовувати так звані

«компаратори», які представлено, як модифікація однофакторного аналізу, коли дійсне значення вимірюваної величини відомим. Схожі висновки зробили і Смірнов з Белугіною [133].

Борисенков [58] для виявлення систематичних похибок запропонував використовувати непараметричні критерії, які включають критерії Вілксона. Також у [59] побудована математична модель систематичних зміщень центру з часом та дисперсію розподілення і застосував отримані результати до виміру кутів у триангуляції.

Інший підхід до задачі опрацювання вимірів, які містять систематичні похибки, описано в роботі [75]. Відома аддитивна структура помилки $\Delta = \delta + \theta$ не має ніякого змісту доти, доки вектор Δ не «занурений» в ту чи іншу ймовірнісну модель, від якої залежить систематична похибка $\theta = M\Delta$.

Інший підхід до задачі опрацювання вимірів, які містять систематичні похибки, описано в праці [113]. Систематичну похибку розглядають, як функцію деякого параметру s , який зв'язаний з умовами вимірів. Наведений приклад, коли закон дії систематичної похибки апроксимується степеневим поліномом від s .

Застосування дисперсійного аналізу для дослідження впливу різних джерел систематичних похибок на точність геодезичних вимірів на умовному прикладі показано авторами [60]. Для цього використано три джерела систематичних похибок: марка (тип) інструменту, досвідченість спостерігача, кількість прийомів. Встановлено, що найбільший вплив має фактор досвідченості спостерігача, наступним є марка інструмента і на третьому місці – кількість прийомів.

Вплив зовнішніх похибок при високоточних вимірах досліджено в [20]. Тут результати вимірів представлені у вигляді $x_{ij} = \mu + A_i + E_{ij}$ ($1 \leq i \leq r, 1 \leq j \leq s$), де $\mu = const$ розглядають, як середнє значення; A_i – фактор впливу зовнішніх похибок; E_{ij} – фактор випадкових похибок. На прикладі конкретних спостережень з використанням критерію дисперсійного аналізу показано, що похибки вимірів по стовпцях (між групами) викликані не тільки випадковими похибками, але й іншими

факторами. Одним з них є систематичні похибки. Такий підхід дозволяє виявити їх та зменшити вплив на результати спостережень.

Розв'язок завдання відбраковки одночасно декількох членів вибірки, що різко відрізняються запропоновано в роботі [118]. Оскільки в раніше відомих методах не вирішена проблема помилкового видалення правильних вимірів при вибірці, то автор пропонує використання «центральної» частини вибірки. Знайдені оптимальні байєсовські правила для фіксованої кількості спостережень, які в геодезії можуть бути інтерпретовані, як систематичні похибки. При невідомій загальній кількості членів вибірки, що різко відрізняються, знайдено оптимальну процедуру відбраковування таких спостережень.

Статистичні дослідження похибок повторного високоточного нівелювання мережі Кримського геодинамічного полігону (1874 і 1977 рр.) виконано в роботі [115].

Задача визначення середньої квадратичної систематичної похибки середнього перевищення на 1 км нівелірного ходу зведено до оцінки зміни центрів груп спостережень у відповідності з теорією дисперсійного аналізу [78]. На основі моделі реальних секційних розходжень наведено оцінку фактору ходу. Для двох груп нівелірних ліній з врахуванням систематично діючих факторів і без них, показано, що оцінка систематичних похибок за формулами автора менша або наближається до значень, які отримані за формулами Васева, але вища за оцінку, яка одержана по формулі Лаллемана.

Інколи сильну варіацію результатів всередині групи викликає фактор, постійний у всіх групах, але змінний залежно від номера спостережень, тобто $\varepsilon_{ij} = \Delta_{ij} + a_i + b_j$. У цьому випадку необхідно застосовувати двофакторний дисперсійний аналіз [8].

Визначення і вилучення значних систематичних похибок, які містяться в результатах вимірів горизонтальних кутів у всіх комбінаціях реалізовано авторами в [146]. Після врівноваження методом найменших квадратів обчислюють поправки u_{ij} кутів і оцінку s^2 дисперсії σ^2 одного виміру. У подальшому перевіряють гіпотезу $s^2 \leq \sigma_0^2$, де σ_0 – нормативне значення, яке відповідає прийнятому класу точності. Для

цього відношення порівнюють з граничним значенням $k(n, \alpha)$, яке залежить від кількості напрямків n і заданого рівня значущості α і обчислюваним за допомогою χ^2 – розподілу. Наявність систематичних помилок перевіряють шляхом складання нормованого максимального відхилення $\max |v_{ij}|$ і з екстремальним значенням обчисленим за допомогою нормального розподілу. Значні систематичні помилки містять у собі ті кути, в яких $|v_{ij}| > \sqrt{\frac{n-2}{mn}} \sigma_0 k(n, \beta)$, де m – кількість прийомів.

Дві задачі з аналізу впливу систематичних та випадкових похибок вимірів у деяких неповних вибірках розглядають у праці [43]. У першій задачі на вимірювану величину X впливають два незалежні фактори: « A » на K рівнях і « B » на n рівнях. В другій задачі на сукупність L виміряних величин X_i впливає фактор « B » на n рівнях. Подано виведення формул для оцінки систематичних та випадкових похибок вимірів у даних вибірках.

Для оцінки дійсної точності багаторазових вимірів однієї і тієї ж величини, у випадку, коли результати вимірів спотворені систематичною похибкою, яка пропорційна до тривалості спостережень, отримано відповідні формули [98]. Інтерпретуючи задачу вимірювання рівномірно змінної в часі величини, можна оцінювати її найбільш надійне значення, в сенсі методу найменших квадратів, віднесеного до початкового або будь-якого іншого моменту часу. Це стає особливо важливим при подальшому врівноваженні ряду величин. Відома з літератури [98]

формула $q^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum d_i^2$ для обчислення середньоквадратичної похибки за послідовними різницями вимірів без врахування їх залежності визнається недостатньо обґрунтованою. Отримані формули мають такий вигляд:

$$\tilde{c} = \frac{\sum_{i=1}^k a_i d_i}{\sum_{i=1}^k p_i}, \quad \sigma_c^2 = \frac{2\sigma_x^2}{\sum_{i=1}^k p_i}$$

де c – оцінка систематичної похибки, $a_i = i(k-i+1) \sum p = \frac{k(k+1)(k+2)}{\sigma}$, якщо

$d_i = x_{i+1} - x_i$ ($i=1,2,\dots,k$). Оцінка для σ_x^2

$$m_x^2 = \frac{2 \sum v_i^2 - c \sum p}{2(k-1)}, \quad (1.1)$$

а середнього арифметичного

$$m_x^2 = m_x^2 \frac{2(2n+1)}{n(n-1)},$$

де v_i – похибка вимірів, $n = k + 1$. Другий доданок в (1.1) – це поправка, яку вводять в формулу Бесселя для виключення впливу спотворення систематичної похибки.

Існуючі методи опрацювання результатів спостережень громіздкі та не дозволяють достеменно усунути систематичні похибки. Необхідно розробити такий метод врівноваження інженерно-геодезичних мереж, який дозволив би опрацьовувати результати спостережень у режимі реального часу, був би математично простим, не потребував довгих рядів спостережень та зменшив би вплив систематичних похибок на отримані результати.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. З досвіду світової практики причинами найчастішого виникнення небезпечних деформацій інженерних споруд є техногенні процеси та антропогенні фактори.

2. На основі аналізу деформаційних процесів, що виникають в інженерних спорудах гідротехнічних об'єктів, встановлено, що комплексні методи їх моніторингу є найефективнішими, оскільки при їх застосуванні виконують контроль достовірності отриманих результатів та досягають максимальну точність.

3. Виконано огляд існуючих методів зменшення впливу систематичних похибок на результати опрацювання результатів вимірювань деформацій та встановлено, що існуючі методи громіздкі, математично складні та не дозволяють достеменно усунути систематичні похибки.

4. Застосування класичних методів опрацювання геодезичних вимірів у системах автоматизованого моніторингу деформацій інженерних споруд не є ефективним і вимагає розробки нових методів опрацювання корельованих між собою результатів вимірів у режимі реального часу з врахуванням систематичних похибок, які є основною перешкодою підвищення точності отримання результатів.

РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ НАПІРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ГЕС ГЕОДЕЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

Особливості місця розташування ГЕС вимагають безперервного контролю за геофізичними процесами, які відбуваються на прилеглих до них територіях. Крім цього, гідротехнічні споруди ГЕС (рис. 2.1) потребують постійного контролю деформаційних процесів. ГЕС дериваційного типу переважно будують на територіях з великими перепадами висот, переважно в гірських районах. Гірські системи збігаються із зонами активних розломів і сейсмотектонічних процесів. У результаті активності тектонічних блоків інженерні споруди зазнають деформаційних навантажень. Найбільш небезпечні деформації можуть виникати на дериваційному і напірному трубопроводах, однак для вивчення деформаційних процесів найбільший інтерес має напірний трубопровід, адже він зазнає найбільших деформацій.



Рис. 2.1 Схема гідроелектростанції [129]

На сьогоднішній день для виконання моніторингу за деформаціями використовують найсучасніше геодезичне та геофізичне обладнання. Покращувати точність отриманих результатів спостережень за рахунок підвищення точності

приладів неможливо, тому необхідно розробити нові або модифікувати вже існуючі методи врівноваження інженерно-геодезичних мереж.

2.1 МОДИФІКОВАНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ВРІВНОВАЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ

ГНСС-виміри активно застосовують під час моніторингу деформацій інженерних споруд ГЕС. На сьогоднішній день на території України вводять в експлуатацію чотири системи активного моніторингу за деформаціями інженерних споруд Дністровської, Канівської, Середньодніпровської (колишня Дніпродзержинська) та Дніпровської ГЕС. В найближчому майбутньому заплановано створення активних систем моніторингу ще на семи гідроелектростанціях. Технологічне обладнання та рельєф місцевості в умовах ГЕС суттєво обмежують доступ до супутників під час ГНСС-вимірів. Відповідно підвищується вплив похибок на результати ГНСС-вимірів. Основні джерела похибок ГНСС-вимірів поділяються на три групи. Це похибки викликані космічним сегментом, похибки проходження сигналів через шари іоносфери та тропосфери та інструментальні похибки [40].

Так само похибки ГНСС-вимірів мають випадковий та систематичний характер. В результаті модифікованого параметричного методу опрацювання ГНСС-вимірів та врівноваження вимірних векторів вплив випадкових похибок на результати вимірів суттєво зменшується. Однак при проведенні одночасних вимірів векторів посилюється прояв систематичних похибок, який пов'язаний з корельованістю цих вимірів. В автоматизованих системах моніторингу практично всі виміри проводять одночасно і відповідно прояв систематичних похибок у них є максимальний. На гідроелектростанціях, на яких відсутні системи автоматизованого моніторингу деформацій, регулярно проводять повторні виміри на гідротехнічних мережах. При цьому, як правило, використовують меншу кількість ГНСС-приймачів, чим пунктів мережі. Відповідно сесії одночасних ГНСС-вимірів охоплюють частину пунктів мережі. У сукупності всі виміри охоплюють усі пункти мережі з достатньою кількістю надлишкових вимірів, необхідних для їх контролю. Для таких схем вимірів вплив систематичних похибок є менший, але тим не менше він є присутнім для кожної

сесії вимірів. Величини систематичних похибок у вимірних векторах залежать від довжин вимірюваних векторів, тривалості вимірів, показника GDOP і його змін в часі, відкритості горизонту під час вимірів та інших факторів.

У роботі [141] автори досліджували еталонний геодезичний базис методом ГНСС-спостережень. На основі отриманих результатів з опрацювань сесій спостережень у різні доби відзначили, що систематичні похибки для довжин ліній порядку 20 км становлять 2 мм.

Відомо, що одними з основних джерел систематичних похибок є тропосферна та іоносферна затримки проходження сигналу від супутника до приймача [14, 15, 21]. Використання двочастотних ГНСС-приймачів дозволяють усувати похибки тільки першого порядку, у той час як залишкові похибки 2-го та вищих порядків можуть складати кілька сантиметрів. У роботі [24] стверджують, що ці похибки зазвичай залежать від кута відсічки супутників. Якщо зменшувати кут відсічки, то похибки тропосферної та іоносферної затримок зменшаться, але натомість похибка за багатошляховість навпаки збільшиться.

Для зменшення похибки за багатошляховість автори [24] пропонують змінювати довжину відбитого сигналу на половину довжини хвилі. Такі маніпуляції з частотами фаз зменшать вплив цієї похибки. Характерною особливістю ще одного методу [23] зменшення похибки за багатошляховість є алгоритм додаткової “пост-обробки” вимірних мереж з використанням повного набору Шрайбергових різниць спостережень з діагональними ваговими матрицями.

Ще однією систематичною похибкою ГНСС вимірів є похибка за зсув фазового центру антени. Нехтування цією похибкою може суттєво спотворити результати спостережень. В роботі [29] автори стверджують, що похибки по висоті можуть досягати до 10 см. Калібрування ГНСС-антен [37] дозволяє частково виявити величину цієї похибки, але у процесі роботи вона може змінюватися. У роботі [10] автори пропонують систему рівнянь, які у процесі “пост-опрацювання” частково усувають цю похибку. Також на якість отриманих результатів спостережень впливають похибки за відбиття сигналу.

Не менш важливими систематичними похибками є похибки орбіт штучних супутників Землі. Ці похибки здебільшого залежать від вибору типу файлу, який містить інформацію про ефемериди супутників та дозволяє розрахувати їх розташування [13]. Найменші похибки містять так звані «Остаточні» ГНСС-файли орбіт супутників [2]. Їх надає Міжнародний ГНСС-сервіс, але слід зазначити, що у вільному доступі вони з'являються через декілька днів. При необхідності можна використовувати файли наближених орбіт супутників, але вони значно погіршують точність отриманих результатів.

Окрім вище згаданих систематичних похибок на точність ГНСС-вимірів впливають похибки атомних годинників [47]. Ці помилки частково усуваються під час диференційних вимірів [1] і у процесі врівноваження мережі, тому їх остаточний вплив можна віднести до випадкових.

Автори [26, 39] пропонують визначати координати пунктів, використовуючи комбінацію методу псевдовідстаней та вимірювання несучих фаз, так як кожний з цих методів окремо не вилучає в достатній мірі систематичні похибки, а тільки спотворює отримані ГНСС-виміри. Використовуючи комбінацію запропонованих методів, автори покращили результати спостережень на 45%, однак цього також не достатньо для високоточних досліджень.

На основі аналізу літературних джерел можна стверджувати, що незважаючи на ефективні методи усунування систематичних похибок у ГНСС-вимірах, їх вплив на остаточні результати вимірюваних величин є суттєвий та підсилюється при опрацюванні одночасних вимірів і при обмеженні доступу до супутникових сигналів в процесі вимірювань. Класичний параметричний метод врівноваження дозволяє в основному усунути тільки випадкові похибки. Тому необхідно розробити такий метод врівноваження, який дозволив би усувати також систематичні похибки.

З метою зменшення впливу систематичних похибок нами пропонується модифікований параметричний метод врівноваження ГНСС-мереж. Розроблений нами метод дозволяє частково усунути систематичні похибки на етапі врівноваження мережі. Цей метод є модифікацією класичного параметричного методу врівноваження. Для часткового вилучення систематичних похибок запропоновано

замість частини рівнянь поправок вимірних векторів складати рівняння поправок різниць цих векторів.

Для класичного параметричного методу рівняння поправок проєкцій ГНСС-вектора на координатні осі є наступні:

$$\begin{aligned} -\delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \delta x_j \frac{\partial f}{\partial x_j} + l_{x_{ij}} &= v_{x_{ij}}, \\ -\delta y_i \frac{\partial f}{\partial y_i} + \delta y_j \frac{\partial f}{\partial y_j} + l_{y_{ij}} &= v_{y_{ij}}, \\ -\delta h_i \frac{\partial f}{\partial h_i} + \delta h_j \frac{\partial f}{\partial h_j} + l_{h_{ij}} &= v_{h_{ij}}, \end{aligned} \quad (2.1),$$

а система рівнянь поправок вимірних ГНСС-векторів має наступний вигляд:

$$AX + l_{AB} = v_{AB}, \quad (2.2),$$

де матриця A для просторового вектора AB має наступний вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.3),$$

а вільний член l_{AB} визначається виразом:

$$l_{AB} = R_B^0 - R_A^0 - \tilde{D}_{AB}, \quad (2.4),$$

де R_A^0 – це наближені координати пункту А; R_B^0 – це наближені координати пункту В; \tilde{D}_{AB} – вимірні прирости координат вектора АВ.

Рівняння поправок вимірюваного ГНСС-вектора має наступний вигляд:

$$v_{AB} = (v_{\Delta X_{AB}}, v_{\Delta Y_{AB}}, v_{\Delta Z_{AB}})^T. \quad (2.5).$$

Кожен вимірний вектор записують у матриці A у вигляді шести стовпців. Поправки X у наближені координати пунктів визначають з розв'язку системи рівнянь за способом найменших квадратів:

$$X = (\delta X_A, \delta X_B, \dots, \delta X_N)^T. \quad (2.6).$$

Коваріаційна матриця, що отримується при розв'язку окремих ГНСС-векторів має тпкий вигляд:

$$K = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.7).$$

Основним недоліком цієї матриці є те, що вона характеризує точність визначення ГНСС-векторів за внутрішньою збіжністю. У ній не враховується вплив похибок за центрування, виміру висоти антени, багатошляховість, похибки положення фазових центрів антен, некорельовані похибки за тропосферну та іоносферну затримки та інші.

Розв'язок системи рівнянь виконують з врахуванням вагової матриці P :

$$P = \sigma_{aprior}^2 K^{-1}, \quad (2.8),$$

де σ_{aprior}^2 – апіорна дисперсія одиниці ваги.

Складають систему нормальних рівнянь:

$$NX + L = 0, \quad (2.9),$$

де $N = A^T P A$, $L = A^T P l$.

Знаходиться вектор параметрів, що оцінюють:

$$\hat{X} = -N^{-1}L, \quad (2.10),$$

та апостеріорна дисперсія одиниці ваги:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{V^T P V}{r}, \quad (2.11),$$

де r – кількість надлишкових вимірів, рівна різниці кількості всіх вимірів та кількості невідомих $r = 3n - 3N$, де n – кількість ГНСС-векторів, N – кількість пунктів, що визначають.

Для обчислення ваг ГНСС-векторів у нульовому наближенні ваги всіх вимірів прирівнюють до одиниці, це обумовлено тим, що матрицю K визначають за внутрішньою збіжністю та всі виміри можна прирівняти до рівноточних. У першому наближенні можна обмежитись тільки діагональними елементами, але прийняти їх для кожного вектора однаковими, тобто $\sigma = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}$. У другому наближенні

використовувати тільки діагональні елементи кожного вектора, а в третьому – використовувати вже повну матрицю K .

При застосуванні класичного методу врівноваження для трикутника утвореного трьома одночасно вимірними векторами, складають дев'ять рівнянь (2.1).

Матриці A і P будуть мати такий вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} \sigma_{X_{ij}}^2 \\ \sigma_{Y_{ij}}^2 \\ \sigma_{Z_{ij}}^2 \\ \sigma_{X_{im}}^2 \\ \sigma_{Y_{im}}^2 \\ \sigma_{Z_{im}}^2 \\ \sigma_{X_{jm}}^2 \\ \sigma_{Y_{jm}}^2 \\ \sigma_{Z_{jm}}^2 \end{bmatrix}.$$

Запишемо добуток двох матриць A і P , як $A\sqrt{P}$:

$$A\sqrt{P} = \begin{bmatrix} -\sigma_{X_{ij}} & 0 & 0 & \sigma_{X_{ij}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_{Y_{ij}} & 0 & 0 & \sigma_{Y_{ij}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_{Z_{ij}} & 0 & 0 & \sigma_{Z_{ij}} & 0 & 0 & 0 \\ -\sigma_{X_{im}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{X_{im}} & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_{Y_{im}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Y_{im}} & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_{Z_{im}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Z_{im}} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{X_{jm}} & 0 & 0 & -\sigma_{X_{jm}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Y_{jm}} & 0 & 0 & -\sigma_{Y_{jm}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Z_{jm}} & 0 & 0 & -\sigma_{Z_{jm}} \end{bmatrix} \quad (2.12).$$

Матрицю коефіцієнтів нормальних рівнянь N будемо обчислювати за наступним виразом:

$$N = (A\sqrt{P})^T (A\sqrt{P}). \quad (2.13).$$

Для модифікованого параметричного методу рівняння поправок пропонуються двох типів, а саме рівняння поправок вимірних векторів (2.1) і рівняння поправок різниць векторів. У кожному трикутнику один вектор залишається у вигляді рівняння поправок (2.1), а два вектори утворюють рівняння їх різниць (2.14).

$$\begin{aligned} -\delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \delta x_m \frac{\partial f}{\partial x_m} + \begin{pmatrix} l_{x_{ij}} & -l_{x_{mj}} \end{pmatrix} &= v_{x_{ijmj}}, \\ -\delta y_i \frac{\partial f}{\partial y_i} + \delta y_m \frac{\partial f}{\partial y_m} + \begin{pmatrix} l_{y_{ij}} & -l_{y_{mj}} \end{pmatrix} &= v_{y_{ijmj}}, \\ -\delta h_i \frac{\partial f}{\partial h_i} + \delta h_m \frac{\partial f}{\partial h_m} + \begin{pmatrix} l_{h_{ij}} & -l_{h_{mj}} \end{pmatrix} &= v_{z_{ijmj}}, \end{aligned} \quad (2.14),$$

де

$$\begin{aligned} l_{x_{ij}} &= \Delta x_{ij_{вим}} - \Delta x_{ij_{набл}}, \\ l_{x_{mj}} &= \Delta x_{mj_{вим}} - \Delta x_{mj_{набл}}, \\ l_{y_{ij}} &= \Delta y_{ij_{вим}} - \Delta y_{ij_{набл}}, \\ l_{y_{mj}} &= \Delta y_{mj_{вим}} - \Delta y_{mj_{набл}}, \\ l_{h_{ij}} &= \Delta h_{ij_{вим}} - \Delta h_{ij_{набл}}, \\ l_{h_{mj}} &= \Delta h_{mj_{вим}} - \Delta h_{mj_{набл}}, \end{aligned}$$

i, j, m – пункти трикутника, між якими виміряні вектори.

Для трикутника ijm , виходячи з другого наближення, система рівнянь буде мати такий вигляд:

$$A\sqrt{P} = \begin{bmatrix} -\sigma_{X_{ij}} & 0 & 0 & \sigma_{X_{ij}} - \sigma_{X_{mj}} & 0 & 0 & \sigma_{X_{mj}} & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_{Y_{ij}} & 0 & 0 & \sigma_{Y_{ij}} - \sigma_{Y_{mj}} & 0 & 0 & \sigma_{Y_{mj}} & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_{Z_{ij}} & 0 & 0 & \sigma_{Z_{ij}} - \sigma_{Z_{mj}} & 0 & 0 & \sigma_{Z_{mj}} \\ -\sigma_{X_{im}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{X_{im}} & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_{Y_{im}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Y_{im}} & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_{Z_{im}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Z_{im}} \end{bmatrix}.$$

Слід зауважити, що для класичного параметричного методу врівноваження матриця $A\sqrt{P}$ для ГНСС-трикутника має дев'ять рівнянь, а для модифікованого параметричного методу їх лише шість, що безумовно понижує жорсткість мережі, але використання різниць двох векторів повинно частково усувати вищезазначені систематичні похибки.

Окрім ГНСС-вимірів під час моніторингу деформацій інженерних споруд ГЕС застосовуються лінійні та лінійно-кутові виміри. Такі виміри також містять у собі ряд похибок. Основними джерелами похибок при лінійно-кутових вимірах є:

- похибки вимірювання кута, які виникають внаслідок неточного центрування тахеометра і візирних цілей;
- приладові похибки, які виникають внаслідок порушень взаємодії частин і механізмів тахеометра;
- власні похибки вимірювання кута – похибки візування і відлічування;
- похибки, викликані впливом несприятливих зовнішніх чинників (умови видимості, коливання зображень тощо).

Частина цих похибок вилучають за рахунок виконання перевірок та юстування приладів, похибки викликані несприятливими зовнішніми умовами частково вилучають за допомогою введення поправок за температуру, вологість та тиск. Окрім того вибирають найсприятливіші періоди доби для ведення спостережень (0,5-1 година після сходу Сонця та 0,5-1 година перед заходом Сонця, а також у похмурі дні). Однак всі ці дії не дозволяють повністю виключити систематичні похибки з результатів спостережень, тому пропонуємо на етапі врівноваження результатів

спостережень використовувати модифікований параметричний метод. Для класичного параметричного методу рівняння поправок вимірів зенітних відстаней є таким:

$$\begin{aligned} & -\delta x_i \frac{\cos \alpha_{ij} \cos z_{ij}}{d_{ij}} - \delta y_i \frac{\sin \alpha_{ij} \cos z_{ij}}{d_{ij}} - \delta h_i \frac{\sin z_{ij}}{d_{ij}} + \\ & + \delta x_j \frac{\cos \alpha_{ij} \cos z_{ij}}{d_{ij}} + \delta y_j \frac{\sin \alpha_{ij} \cos z_{ij}}{d_{ij}} + \delta h_j \frac{\sin z_{ij}}{d_{ij}} + l = v, \end{aligned} \quad (2.15),$$

де d – просторова відстань між пунктами трикутника; α – азимут, z – зенітна віддаль, $l = z_{вим} - z_{набл}$.

Якщо ж використовувати модифікований параметричний метод врівноваження мереж, то формула (2.15) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} & -\delta x_i \left(\frac{\cos \alpha_{ij} \cos z_{ij}}{d_{ij}} - \frac{\cos \alpha_{im} \cos z_{im}}{d_{im}} \right) - \delta y_i \left(\frac{\sin \alpha_{ij} \cos z_{ij}}{d_{ij}} - \frac{\sin \alpha_{im} \cos z_{im}}{d_{im}} \right) - \\ & - \delta h_i \left(\frac{\sin z_{ij}}{d_{ij}} - \frac{\sin z_{im}}{d_{im}} \right) + \delta x_j \frac{\cos \alpha_{ij} \cos z_{ij}}{d_{ij}} + \delta y_j \frac{\sin \alpha_{ij} \cos z_{ij}}{d_{ij}} + \delta h_j \frac{\sin z_{ij}}{d_{ij}} - \\ & - \delta x_m \frac{\cos \alpha_{im} \cos z_{im}}{d_{im}} - \delta y_m \frac{\sin \alpha_{im} \cos z_{im}}{d_{im}} - \delta h_m \frac{\sin z_{im}}{d_{im}} + l_{ij} - l_{im} = v, \end{aligned} \quad (2.16),$$

Використання високоточного нівелювання також є одним з методів дослідження деформаційних процесів інженерних споруд ГЕС. Однак, як і інші геодезичні методи, він містить похибки в результатах спостережень.

Основними джерелами похибок під час виконання лінійних вимірів є:

- вплив кривини Землі і рефракції атмосфери;
- невиконання головної умови нівеліра;
- похибки відліків на шкалах рейок;
- похибки приведення приладу до горизонту;
- похибки у нанесенні ділень шкал рейок;
- похибка у відліку через нахил рейки.

Вплив вищеперахованих похибок можливо зменшити за рахунок виконання спостережень у найбільш сприятливі періоди доби, врахування поправок за

рефракцію атмосфери, температуру, вологість повітря та тиск. Також перед початком виконання спостережень необхідно виконати перевірки нівеліра та рейок. Однак виконання всіх цих умов не дозволяє повністю виключити систематичні похибки з результатів спостережень. Тому необхідно проводити додаткові математичні перетворення на етапі врівноваження отриманих результатів. Пропонуємо використовувати модифікований параметричний метод врівноваження, який дозволяє значно зменшити вплив систематичних похибок. Для класичного параметричного методу рівняння поправок виміру похилої лінії є такими:

$$\begin{aligned} -\delta x_i \cos \alpha_{ij} \cos z_{ij} - \delta y_i \sin \alpha_{ij} \cos z_{ij} - \delta h_i \sin z_{ij} + \delta x_j \cos \alpha_{ij} \cos z_{ij} + \\ + \delta y_j \sin \alpha_{ij} \cos z_{ij} + \delta h_j \sin z_{ij} + (d_{вим} - d_{набл}) = \nu, \end{aligned} \quad (2.17),$$

де d – просторова відстань між пунктами трикутника; α – кут між пунктами; z – зенітна віддаль.

У модифікованому параметричному методі формула (2.17) прийме такий вигляд:

$$\begin{aligned} -\delta x_i (\cos \alpha_{ij} \cos z_{ij} - \cos \alpha_{im} \cos z_{im}) - \delta y_i (\sin \alpha_{ij} \cos z_{ij} - \sin \alpha_{im} \cos z_{im}) - \\ - \delta h_i (\sin z_{ij} - \sin z_{im}) + \delta x_j \cos \alpha_{ij} \cos z_{ij} + \delta y_j \sin \alpha_{ij} \cos z_{ij} + \delta h_j \sin z_{ij} - \end{aligned} \quad (2.18).$$

$$-\delta x_m \cos \alpha_{im} \cos z_{im} - \delta y_m \sin \alpha_{im} \cos z_{im} - \delta h_m \sin z_{im} + (d_{ij} - d_{ij}^0) - (d_{im} - d_{im}^0) = \nu$$

Рівняння поправок виміру напрямку для класичного параметричного методу наступне:

$$-\delta x_i \frac{\cos \alpha_{ij}}{S_{ij}} - \delta y_i \frac{\sin \alpha_{ij}}{S_{ij}} + \delta x_j \frac{\cos \alpha_{ij}}{S_{ij}} + \delta y_j \frac{\sin \alpha_{ij}}{S_{ij}} + l = \nu, \quad (2.19),$$

де $l = S - S^0$ (S – виміряна відстань між пунктами, S^0 – теоретична відстань між пунктами).

Для модифікованого параметричного методу врівноваження (2.19) прийме такий вигляд:

$$-\delta x_i \left(\frac{\cos \alpha_{ij}}{S_{ij}} - \frac{\cos \alpha_{im}}{S_{im}} \right) - \delta y_i \left(\frac{\sin \alpha_{ij}}{S_{ij}} - \frac{\sin \alpha_{im}}{S_{im}} \right) + \delta x_j \frac{\cos \alpha_{ij}}{S_{ij}} + \delta y_j \frac{\sin \alpha_{ij}}{S_{ij}} - \quad (2.20).$$

$$-\delta x_m \frac{\cos \alpha_{im}}{S_{im}} - \delta y_m \frac{\sin \alpha_{im}}{S_{im}} + l_{ij} - l_{im} = v.$$

Відповідно у модифікованому параметричному методі, на відміну від класичного параметричного методу, кількість рівнянь поправок для кожного трикутника буде на одне менше, що погіршує стійкість розв'язку та негативно впливає на оцінку точності врівноваженої мережі, але дає можливість вилучати систематичні похибки. Подальше врівноваження мережі модифікованим параметричним методом виконують за способом найменших квадратів.

2.2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДИФІКОВАНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВРІВНОВАЖЕННЯ В ПОРІВНЯННІ З КЛАСИЧНИМ ПАРАМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

З метою перевірки модифікованого параметричного методу необхідно дослідити його ефективність та розрахувати апріорну точність і точність визначення координат порівняно з класичним параметричним методом. Є два шляхи виконання таких досліджень:

1. Статистичний – моделювання мережі, похибок вимірів у ній та в подальшому виконання її врівноваження.
2. Експериментальний – виконання вимірювання на тестовому полігоні та врівноваження отриманих результатів спостережень.

У даному дослідженні ми використали статистичний метод, оскільки ефективність може бути розрахована за результатами оцінки точності, яка характеризує похибки вимірів, тобто відхилення результатів вимірів відносно результатів врівноваження, а для змодельованих мереж при визначенні ефективності слід застосовувати також такий параметр як помилки, що визначається як відхилення модельних значень вимірів відносно «істинних».

З цією метою нами розроблена методика моделювання мереж, яка відповідає параметрам автоматизованих мереж моніторингу. На основі цієї методики нами змодельовані геодезичні мережі, які за розміром, конфігурацією, жорсткістю, розподілом похибок вимірів відповідають сучасним автоматизованим високоточним

геодезичним мережам, призначеним для моніторингу деформацій інженерних споруд ГЕС.

Змінними параметрами при моделюванні геодезичних мереж є:

- розміри мереж;
- кількість пунктів у мережах;
- кількість надлишкових вимірів (жорсткість мережі);
- кількість змодельованих мереж;
- діапазон систематичних похибок;
- діапазон випадкових похибок.

При моделюванні мереж відстань між пунктами змінювалася у межах 8 км, максимальні перепади висот між пунктами були в межах 0,05-0,5 км. Максимальна кількість пунктів – від 7 до 25. Такі обмеження конфігурації мереж зумовлені особливостями географічного розташування територій гідроелектростанцій. Коефіцієнт жорсткості q оцінювався, як для просторових мереж, так і для планових, за такими виразами:

$$\begin{aligned} q_{\text{прос}} &= \sqrt[3]{\det(Q)^{n-k}} \\ q_{\text{план}} &= \sqrt[2]{\det(Q)^{n-k}}, \end{aligned} \quad (2.21),$$

де n – кількість пунктів в мережі, k – кількість жорстких пунктів, Q – коваріаційна матриця. Для інженерно-геодезичних мереж жорсткість повинна змінюватися у межах від 0,01 до 1,5 мм. Межі випадкових похибок повинні бути від 2 до 4 мм, що відповідає технічним характеристикам сучасних прецизійних геодезичних приладів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Моделі сучасних лінійних геодезичних приладів

Прилад	Рівняння регресії с.к.п.	Моделі приладів
Електрон- ні тахеометри	0,6 мм +1 ppm	Leica Nova TS-50, TS-60, TM-50, TM-30
	1 мм +1 ppm	Leica TCA-2003
	1 мм +1,5 ppm	Leica Nova MS-50, Nova MS-60
	1 мм +2 ppm	Trimble S6, S8
	1,5 мм +2 ppm	Trimble S3; Sokkia SX 101T/103T/105T
	2 мм +2 ppm	Trimble M1, 5601 DR, 5602, 5603; Leica TPS 1201/1202/1203
ГНСС приймачі	Планова: ±3 мм+0,1ppm; Висотна: ±3,5мм+0,4ppm	Leica (GS08 NetRover, GS09, VIVA); Topcon (Hiper+, NET-G3A); Trimble (R4, R6, R7, R8, R9, R10 NETR9); Hi-target (V9-S, V8200X).

Систематичні похибки змінювалися за випадковим законом. Максимальні систематичні похибки були у межах наступних інтервалів: 0 мм, 0 ÷ 1 мм, 0 ÷ 2 мм, 0 ÷ 3 мм, 0 ÷ 4 мм, 0 ÷ 5 мм, 0 ÷ 10 мм. Більші значення не використовували, адже для їх виникнення необхідні екстремальні умови, а саме значні коливання температури та вологості повітря, які не характерні для території розташування ГЕС.

Для моделювання мереж, їх врівноваження, розрахунку апіорної оцінки точності та дослідження ефективності була складена відповідна програма в програмному пакеті MathCAD, яка складалась з вихідних даних та п'яти блоків (рис. 2.2).

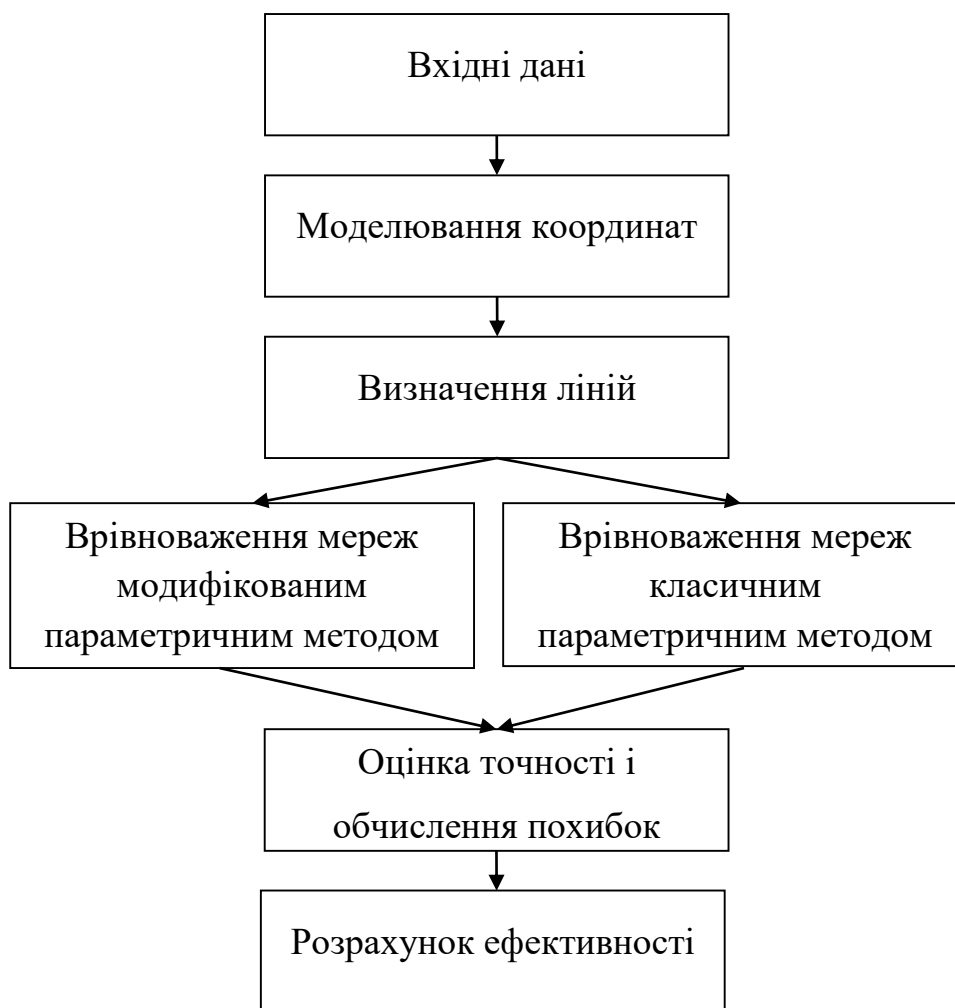


Рис. 2.2 Блок-схема складеної програми

Розглянемо детальніше основні етапи програми. Вхідними даними були: конфігурація мережі, яка вибиралась за випадковим законом з врахуванням розмірів території та кількості пунктів у мережі; жорсткість пунктів, яка змінювалася у межах від 0 до 1,5 з інтервалом – 0,15. Кожна вибрана мережа з встановленими параметрами підлягала моделюванню координат її пунктів за допомогою генератора випадкових чисел не менше ніж 30 разів.

Наступний блок програми моделює координати пунктів за випадковим законом у межах заданої у вихідних даних території. Слід зазначити, що спочатку моделювали мережу з мінімальною кількістю пунктів – 7. У процесі моделювання програма створює кілька тисяч мереж і з них вибирає мережу заданої жорсткості, при цьому жорсткість мережі послідовно змінюється $0 \pm 1,5$, адже ми розглядаємо мережу, в якій є видимість та відповідно виміри між всіма пунтами, в іншому випадку жорсткість мережі послаблюється. Координати пунктів визначаються генератором випадкових

чисел та приймаються за істинні (X^0, Y^0, H^0) . Для прикладу наведено зразок мережі, який утворений сімома пунктами. В таблиці 2.2 наведено змодельовані координат, які приймають за істинні, та схема їх розташування (див. рис. 2.3).

Таблиця 2.2

Координати згенерованої мережі

ГЕС із 7 пунктів

Пункт	X^0 , м	Y^0 , м	H^0 , м
1	5,0737	2431,8884	320,7939
2	773,2921	731,2901	124,8123
3	2340,0244	1178,5073	252,8537
4	1401,2324	7908,0678	75,6752
5	3291,3509	952,6379	402,4936
6	696,5160	71,3813	283,9443
7	2841,9816	4253,3133	444,1857

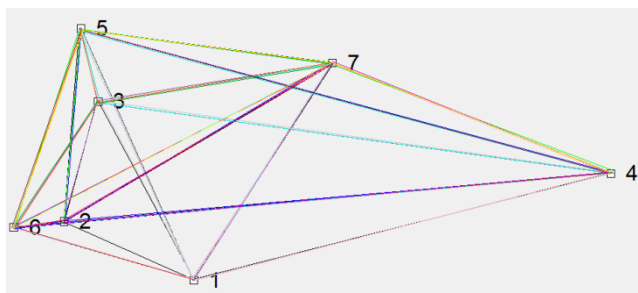


Рис. 2.3 Схема згенерованої геодезичної мережі ГЕС з 7 пунктів

В наступному блоці програми на основі істинних координат пунктів визначаються довжини усіх можливих ліній. У лінії вводяться випадкові та систематичні похибки, які моделюються генератором випадкових чисел та не перевищують задані у вхідних даних діапазони, а саме від 2 до 4 мм. У таблиці 2.3 представлено довжини ліній (L_1^0, L_2^0) , визначені з істинних координат пунктів, та лінії (L_1, L_2) , спотворені випадковими та систематичними похибками координат пунктів, а також різниці між ними $(\Delta L_1, \Delta L_2)$.

Обчислені істинні та спотворенні лінії змодельованої мережі

№ трикутника	L_1^0 , мм	L_2^0 , мм	L_1 , мм	L_2 , мм	ΔL_1 , мм	ΔL_2 , мм
1	2	3	4	5	6	7
1	2650957,4	1634334,1	2650962,4	1634335,2	5,1	1,1
2	5656667,1	7204364,0	5656675,0	7204366,8	7,9	2,8
3	3604785,0	2542975,0	3604789,1	2542976,5	4,1	1,4
4	2459968,3	683152,4	2459968,0	683155,5	-0,3	3,0
5	3373553,1	4097087,1	3373556,6	4097091,5	3,5	4,4
6	5656667,1	6797036,6	5656672,2	6797036,7	5,1	0,1
7	3604785,0	989156,8	3604787,9	989154,7	2,8	-2,2
8	2459968,3	1981871,5	2459970,3	1981870,0	2,0	-1,5
9	3373553,1	3121378,0	3373555,8	3121377,8	2,7	-0,2
10	3604785,0	7215078,9	3604785,5	7215081,4	0,5	2,5
11	2459968,3	7871064,5	2459968,2	7871067,2	-0,1	2,7
12	3373553,1	3945730,5	3373557,6	3945733,6	4,4	3,2
13	2459968,3	2742961,0	2459969,9	2742965,1	1,6	4,0
14	3373553,1	3331385,5	3373559,5	3331385,8	6,4	0,4
15	3373553,1	4702898,6	3373553,2	4702901,7	0,1	3,1
16	7204364,0	6797036,6	7204371,5	6797040,1	7,5	3,5
17	2542975,0	989156,8	2542974,3	989154,8	-0,8	-2,1
18	683152,4	1981871,5	683153,4	1981869,1	1,0	-2,4
19	4097087,1	3121378,0	4097087,1	3121377,3	0,0	-0,7
20	2542975,0	7215078,9	2542976,5	7215083,6	1,5	4,7
21	683152,4	7871064,5	683153,5	7871070,0	1,1	5,5
22	4097087,1	3945730,5	4097085,4	3945730,5	-1,7	0,0
23	683152,4	2742961,0	683149,8	2742964,8	-2,6	3,8
24	4097087,1	3331385,5	4097089,0	3331387,1	1,9	1,6

1	2	3	4	5	6	7
25	4097087,1	4702898,6	4097092,5	4702900,0	5,4	1,4
26	989156,8	7215078,9	989157,5	7215084,0	0,7	5,1
27	1981871,5	7871064,5	1981872,9	7871071,8	1,4	7,3
28	3121378,0	3945730,5	3121381,5	3945734,9	3,5	4,5
29	1981871,5	2742961,0	1981870,6	2742960,3	-0,9	-0,8
30	3121378,0	3331385,5	3121375,5	3331388,4	-2,5	2,9
31	3121378,0	4702898,6	3121378,8	4702899,3	0,7	0,7
32	7871064,5	2742961,0	7871074,0	2742959,8	9,5	-1,3
33	3945730,5	3331385,5	3945735,2	3331384,2	4,7	-1,2
34	3945730,5	4702898,6	3945728,2	4702905,1	-2,3	6,5
35	3331385,5	4702898,6	3331387,1	4702901,9	1,6	3,3

Для мережі з 7 пунктів кількість комбінацій ліній становить 35, адже для кожного пункту вимірюються віддалі на два інші пункти, які вважають вимірними майже одночасно.

Для наочності на рис. 2.4 представлено гістограма розподілу згенерованих систематичних та випадкових похибок координат пунктів, які отримують як різниці спотворених та істинних ліній (ΔL_1 , ΔL_2 , табл. 2.3).

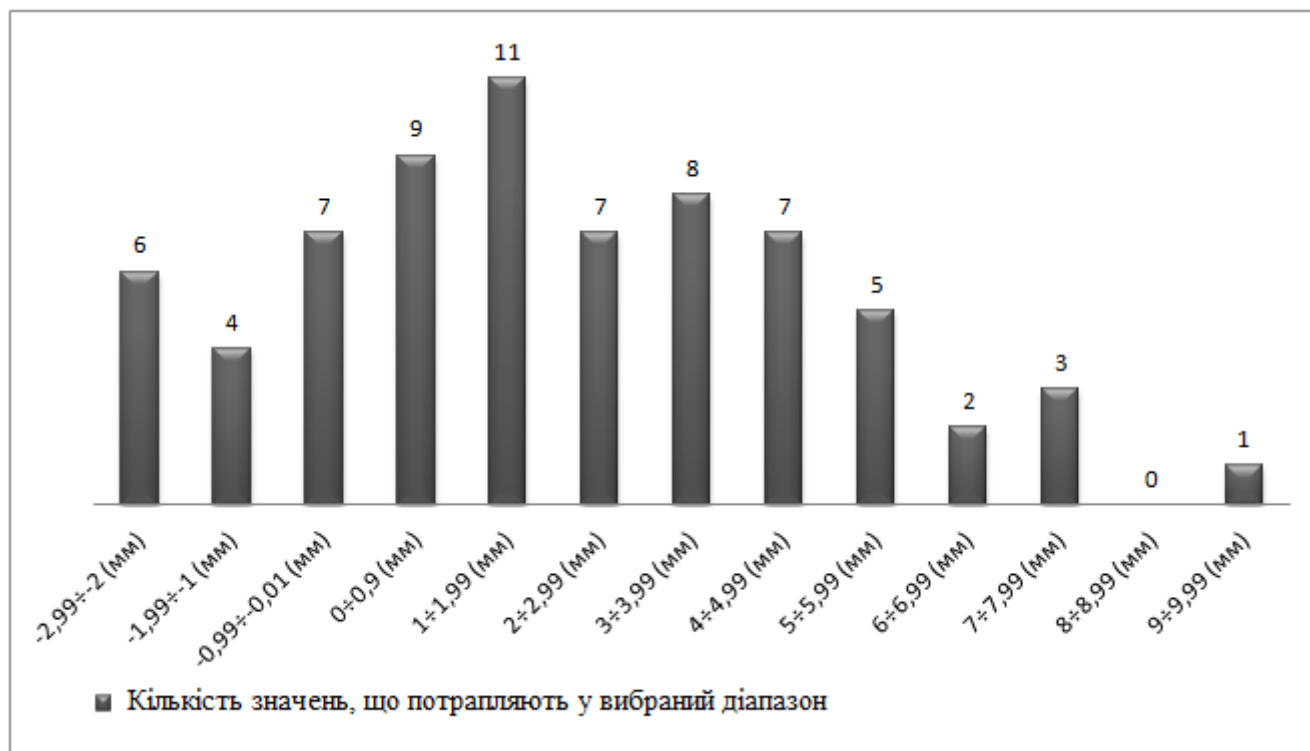


Рис. 2.4 Гістограма розподілу згенерованих систематичних та випадкових похибок координат пунктів

На цьому блок моделювання ліній завершується.

Четвертий блок виконує врівноваження мережі згідно змодельованих вимірів. Врівноваження виконують двома способами – модифікованим параметричним та класичним параметричним (формули 2.1, 2.2), тому його розділяють на два паралельні блоки опрацювання. В таблиці 2.4 представлено координати пунктів врівноваженої мережі двома методами.

Таблиця 2.4

Координати пунктів мережі врівноваженої модифікованим параметричним та параметричним методами

Пункт	Модифікований параметричний метод			Класичний параметричний метод		
	X, м	Y, м	H, м	X, м	Y, м	H, м
1	2	3	4	5	6	7
1	5,0737	2431,8884	320,7939	5,0737	2431,8884	320,7939
2	773,2921	731,2901	124,8123	773,2921	731,2901	124,8123

1	2	3	4	5	6	7
3	2340,0244	1178,5073	252,8537	2340,0244	1178,5073	252,8537
4	1401,2457	7908,0719	75,6929	1401,2204	7908,0644	75,7392
5	3291,3550	952,6392	402,4618	3291,3461	952,6400	402,5237
6	696,5173	71,3809	283,9457	696,5157	71,3838	283,9428
7	2841,9860	4253,3121	444,1959	2841,9751	4253,3105	444,1651

У наступному блоці програми за поправками у виміряні лінії визначаються похибки одиниці ваги, а також помилки та похибки. В таблицях 2.5 та 2.6 представлено помилки (δ) та похибки (m) координат пунктів, з врівноваження мережі модифікованим параметричним та класичним параметричним методами для мережі, утвореної сімома пунктами. Похибки одиниці ваги (μ) для цієї ж мережі становлять: 2,2 мм для модифікованого параметричного методу і 3,6 мм для класичного методу врівноваження.

Таблиця 2.5

**Помилки визначених координат пунктів мережі модифікованим
параметричним і класичним параметричним методами**

№ пункту	δ_x , мм		δ_y , мм		δ_h , мм	
	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод
4	12,1	-13,3	3,4	-4,1	-64,0	-17,8
5	4,8	-4,1	-2,1	-1,4	-30,0	31,9
6	0,2	-1,3	-2,5	0,4	1,5	-1,5
7	6,5	-4,4	2,8	1,2	20,6	-10,2
$ \Sigma $	23,6	23,1	10,8	7,1	116,2	61,3

**Похибки визначених координат пунктів мережі модифікованим
параметричним і класичним параметричним методами**

№ пункту	m_x , мм		m_y , мм		m_h , мм	
	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод
4	6,1	6,2	1,8	2,8	63,1	72,0
5	2,2	3,1	4,0	3,7	16,4	21,4
6	1,3	1,8	1,0	2,2	6,0	8,4
7	1,5	3,3	3,9	3,0	53,2	51,9
Σ	11,1	14,3	10,5	11,7	138,7	153,6

Останній блок програми розраховує оцінку ефективності модифікованого параметричного методу порівняно з класичним параметричним. Для цього на підставі розрахунків усіх мереж обчислюють коефіцієнти ефективності (E) на основі помилок та похибок визначення координат пунктів мережі двома методами:

$$E_{\delta} = \frac{\sum_1^n \sqrt{\delta_{x_{\text{клас}}}^2 + \delta_{y_{\text{клас}}}^2 + \delta_{h_{\text{клас}}}^2}}{\sum_1^n \sqrt{\delta_{x_{\text{мод}}}^2 + \delta_{y_{\text{мод}}}^2 + \delta_{h_{\text{мод}}}^2}} \quad (2.22),$$

$$E_m = \frac{\sum_1^n \sqrt{m_{x_{\text{клас}}}^2 + m_{y_{\text{клас}}}^2 + m_{h_{\text{клас}}}^2}}{\sum_1^n \sqrt{m_{x_{\text{мод}}}^2 + m_{y_{\text{мод}}}^2 + m_{h_{\text{мод}}}^2}}$$

де n – кількість пунктів в мережі, m – похибки визначення координат пунктів мережі, δ – помилки визначення координат пунктів мережі. Результати досліджень виводять у табличному і графічному виглядах.

Для виявлення ефективності мереж від кількості пунктів та жорсткості був проведений експеримент, який полягав у виконанні моделювання та врівноваження мереж з наступними параметрами:

- Кількість пунктів у мережі – від 7 до 25 з кроком 1;

- Розміри мереж – по широті та довготі $0 \div 4$ км, по висоті $0,05 \div 0,5$ км;
- Кількість змодельованих мереж, для кожної кількості пунктів – 30;
- Систематичні похибки змінювались у діапазоні $0 \div 2$ мм;
- Випадкові похибки змінювались у діапазоні $0 \div 2$ мм;
- Жорсткість мережі змінювалась у діапазоні $0 \div 1,5$.

За результатами опрацювання змодельованих мереж було визначено ефективність кожної мережі. Результати усереднені і представлені графічно, як для планових так і для просторових мереж.

На рисунку 2.5 представлено залежність ефективності модифікованого параметричного методу врівноваження по відношенню до класичного параметричного залежно від кількості пунктів мережі.

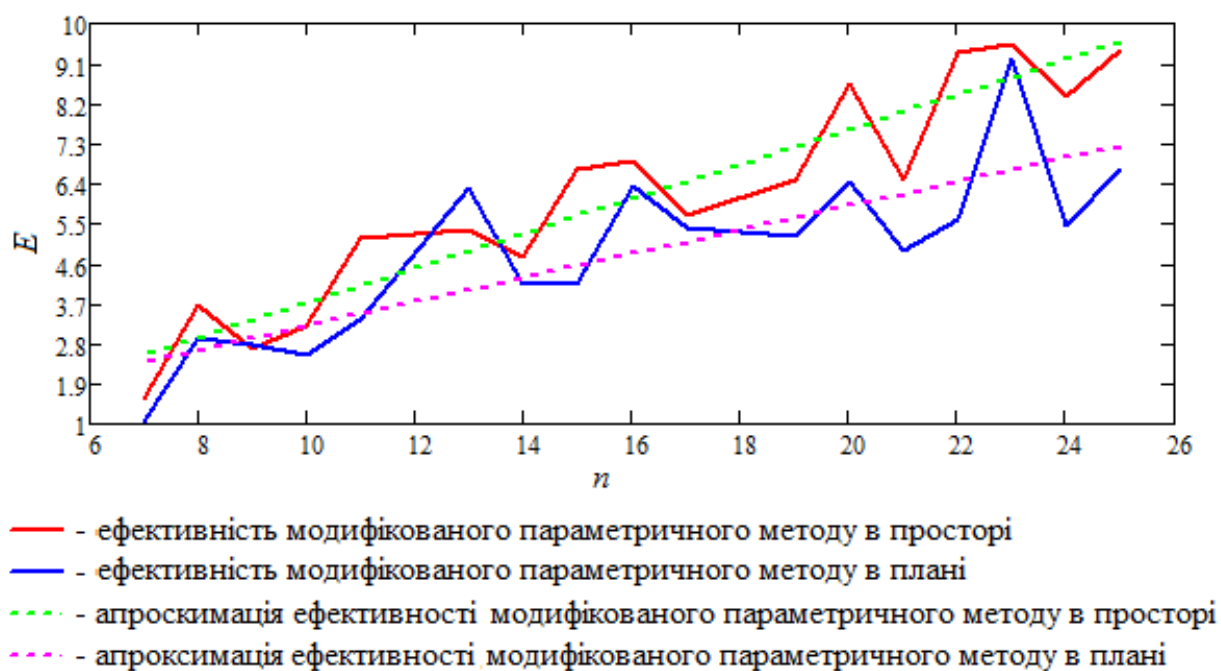


Рис. 2.5 Ефективність модифікованого параметричного методу при зрівнюванні просторових та планових мереж на основі співвідношення середніх похибок з врівноваження двома методами

Згідно з алгоритмом виконано і представлено ефективність для просторових та планових мереж. Для прогнозування ефективності (E) мереж наведено їх лінійні апроксимації. Апроксимаційні залежності мають такий вигляд:

$$E_{\text{прос}} = (-0,185 \pm 0,05) + (0,391 \pm 0,12) \cdot n \quad (2.23),$$

$$E_{план} = (0,506 \pm 0,01) + (0,270 \pm 0,11) \cdot n$$

де n – кількість пунктів в мережі.

Проаналізувавши рисунок 2.5, можна стверджувати, що крива має стрибко подібний характер, але загальна тенденція – це зростання. Зі збільшенням кількості пунктів у мережах ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження вища та змінюється у межах $2,6 \div 9,5$ для просторових мереж і $2,3 \div 7,2$ для планових.

За результатами врівноваження мереж двома методами були обчислені систематичні та випадкові похибки опрацювання мереж і на рис. 2.6 представлено їх середні співвідношення для кожної мережі. З графіка видно, що співвідношення змінюється у межах $1,03 \div 1,09$, що задовольняє вхідні параметри, адже діапазони їх зміни для даного випадку рівні.



Рис. 2.6 Зміна співвідношення систематичних до випадкових похибок

На рисунку 2.7 представлено співвідношення середніх помилок визначення координат пунктів з врівноваження параметричним методом до середніх помилок з врівноваження модифікованим параметричним методом.

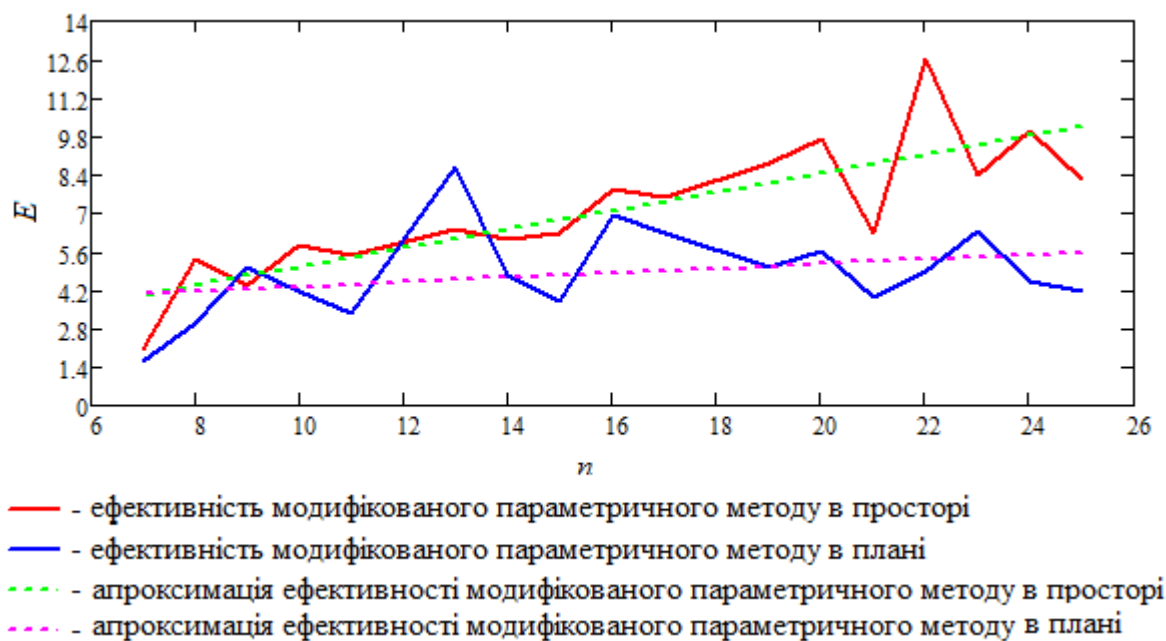


Рис. 2.7 Ефективність модифікованого параметричного методу при порівнянні просторових та планових мереж на основі співвідношення середніх помилок з врівноваження двома методами

Згідно з алгоритмом виконано і представлено ефективність для просторових та планових мереж. Для прогнозування ефективності мереж приведено їх лінійні апроксимації. Апроксимаційні залежності мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{прост}} &= (1,644 \pm 0,33) + (0,341 \pm 0,086) \cdot n \\
 E_{\text{план}} &= (3,471 \pm 0,2) + (0,084 \pm 0,04) \cdot n
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

Виконавши аналіз рисунку 2.7, можна стверджувати, що графік має стрибко подібний характер, але загальна його тенденція – зростання. Ефективність модифікованого параметричного методу зростає зі збільшенням кількості пунктів у мережі та змінюється у діапазоні $4,2 \div 10,0$ для просторових мереж і $4,1 \div 5,6$ для планових.

На рисунку 2.8 представлено апроксимаційні залежності співвідношення середніх помилок та похибок визначення координат пунктів з врівноваження параметричних методів до середніх помилок та похибок з врівноваження модифікованим параметричним методом.

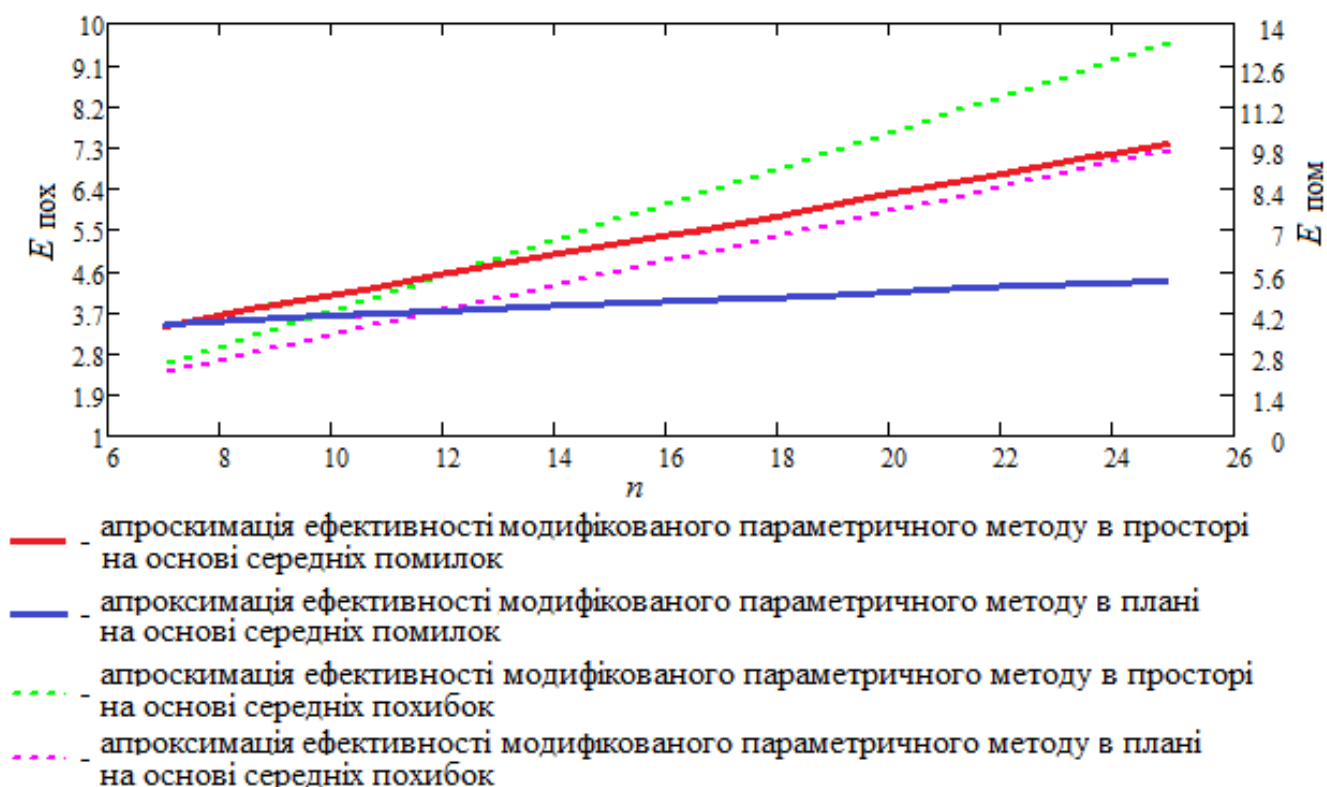


Рис. 2.8 Ефективність модифікованого параметричного методу при порівнянні просторових та планових мереж на основі співвідношення середніх помилок та похибок з врівноваження двома методами

Проаналізувавши рисунок 2.8, можна стверджувати, що ефективність модифікованого параметричного методу зростає зі збільшенням кількості пунктів у мережі. Однак порівнюючи значення ефективності, отримані на основі співвідношення середніх похибок та помилок визначення координат пунктів, можна стверджувати, що значення, отримані на основі похибок, є дещо завищені для просторових мереж, та ефективність зростає стрімкіше.

Рисунок 2.9 відображає залежність жорсткості врівноважених мереж двома методами від кількості пунктів.

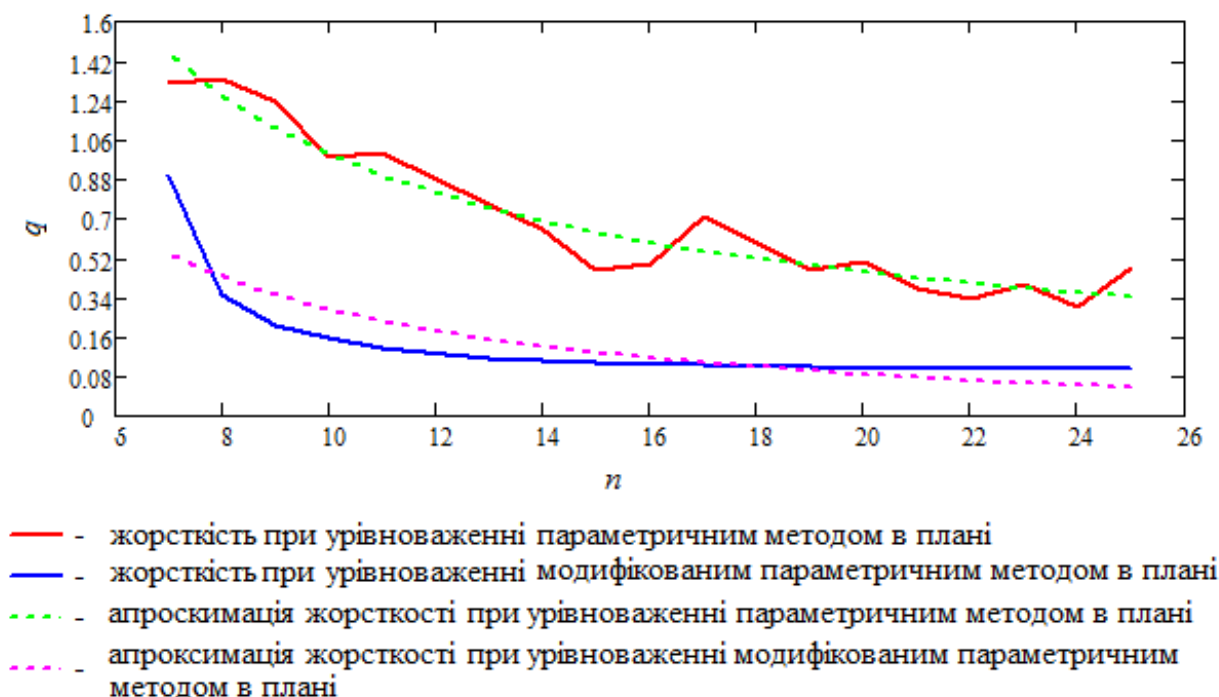


Рис. 2.9 Залежність жорсткості врівноважених мереж від кількості пунктів

Такі залежності визначено для мереж, врівноважених модифікованим параметричним методом та мереж, врівноважених класичним параметричним методом. Для досліджуваних співвідношень виведені апроксимаційні залежності:

$$q_{\text{клас}} = (-0,083 \pm 0,011) + \frac{(10,794 \pm 0,98)}{n} \quad (2.25),$$

$$q_{\text{мод}} = (-0,306 \pm 0,027) + \frac{(5,913 \pm 0,67)}{n}$$

де n – кількість пунктів у мережі.

Проаналізувавши рис. 2.9, видно, що жорсткість зростає, і криві мають вигляд близький до оберненої функції. З врівноваження параметричним методом жорсткість змінюється в межах від 1,44 до 0,40, а з врівноваження модифікованим параметричним методом – від 0,88 до 0,03. Також слід зазначити, що із збільшенням кількості пунктів мережі стають жорсткіші.

Після дослідження ефективності обох методів врівноваження мереж та отриманих значень жорсткості необхідно визначити залежність безпосередньо між ними. На рис. 2.10 представлено саме залежність ефективності врівноваження планової мережі модифікованим параметричним методом від жорсткості мережі.

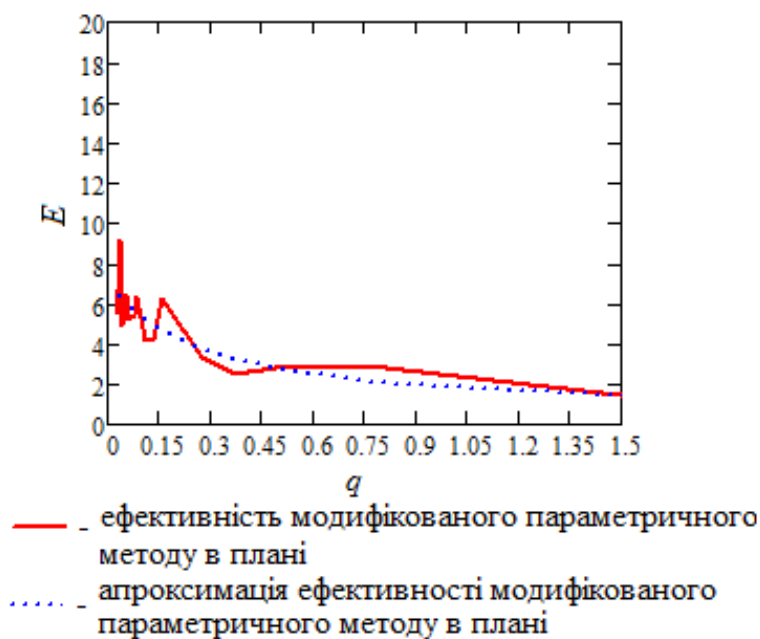


Рис. 2.10 Співвідношення ефективності врівноваження планової мережі модифікованим параметричним методом до значення коефіцієнта жорсткості

З рисунку 2.10 видно, що чим більша жорсткість мережі, тим більша ефективність врівноваження. Для досліджуваних співвідношень виведена апроксимаційна залежність:

$$E = (0,285 \pm 0,063) + \frac{(0,749 \pm 0,097)}{((0,391 \pm 0,068) \cdot q + (0,109 \pm 0,026))} \quad (2.26).$$

На основі проведеного експериментального дослідження можна стверджувати, що ефективність мережі найкраще відображається при дослідженні її залежності від коефіцієнта жорсткості, а не від кількості пунктів у ній. Отримані формули можуть бути поширені на значно більші мережі та уточнені за зміну жорсткості мережі при зменшенні кількості надлишкових вимірів. Також отриманий статистичний метод дослідження можна модифікувати та застосовувати при дослідженні кутових та лінійно-кутових мереж.

З метою впровадження методу підвищення точності дослідження деформацій інженерних споруд ГЕС необхідно розробити методику оцінки точності визначення деформацій за результатами лінійно-кутових геодезичних вимірів.

2.3 РОЗРАХУНОК ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗСУВУ ТА ДЕФОРМАЦІЙ НАПІРНИХ ТРУБОПРОВІДІВ

Дослідження деформаційних процесів вимагає високої точності результатів, тому важливим є точність з якою їх визначають. Для кожного елементу ГЕС точність розраховують окремо. Так як напірний трубопровід є однією з аварійно найнебезпечніших ділянок ГЕС, то необхідно розрахувати апріорну точність визначення його деформацій [135, 143].

Для розрахунку попередньої точності визначення параметрів деформацій напірний трубопровід можна представити модельно у вигляді ламаної лінії, точки вигину якої розташовані на земній поверхні. Через поверхню проходять силові напруги, які передаються на трубопровід і викликають зміщення та деформації [72].

Напірний трубопровід має одномірне простягання, тому модель можна представити у вигляді прямої, що з'єднує два вигини. Компоненти деформацій досліджуваної моделі мають такі складові: γ – компонента зсуву (зсув – це вид деформації, при якому величина зміщення кожної точки тіла зростає в напрямку, перпендикулярному до напрямку зміщення), Θ – обертання, Δ – дилатація (загальне розширення, розтяг), $[m, n, l]$ – направляючі косинуси вектора, навколо якого відбувається обертання. В результаті досліджень отримані формули для обчислення компонентів деформацій та складові формул зображені на рис. 2.11.

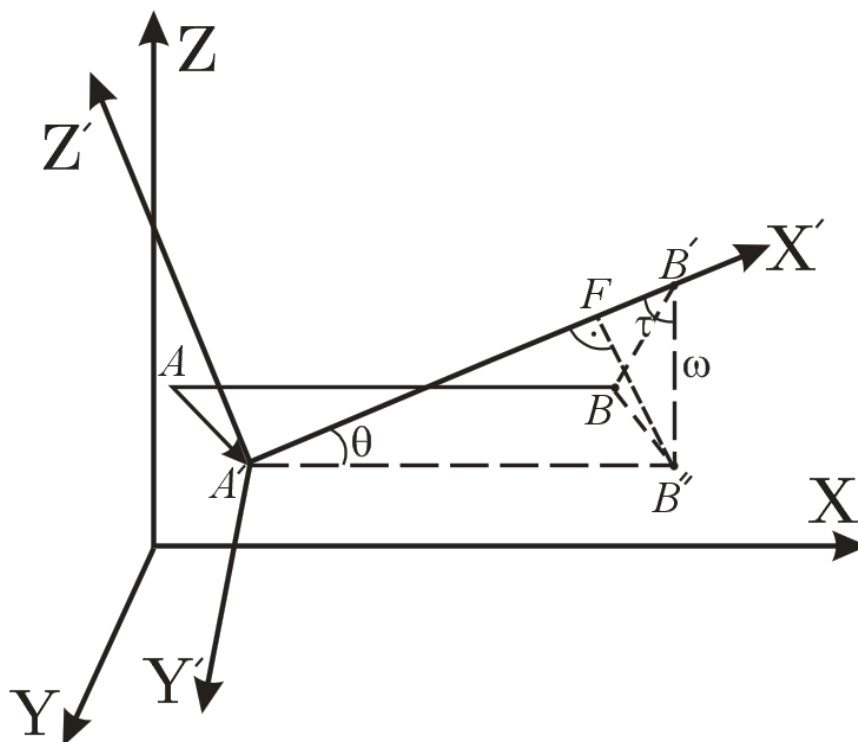


Рис. 2.11 Деформація прогону напірного трубопроводу

Зміщення центра ваги по координатних осях обчислюють за такими формулами:

$$\gamma_x = \frac{u_2 + u_1}{2L \cos \alpha} \quad (2.27),$$

$$\gamma_y = \frac{t_2 + t_1}{2L \cos \beta} \quad (2.28),$$

$$\gamma_z = \frac{v_2 + v_1}{2L \cos \phi} \quad (2.29),$$

де $u_1, u_2, t_1, t_2, v_1, v_2$ – проекції зміщень двох сусідніх опор на координатні осі X, Y, Z , $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \phi$ – направляючі косинуси прогону, L – довжина прогону.

Для обчислення чистого зсуву формула має такий вигляд:

$$\gamma = \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2 + \gamma_z^2} \quad (2.30),$$

Знайдемо часткові похідні функції $\gamma_x = \gamma_x(\alpha, u_1, u_2, L)$ для формули (2.27)

$$\frac{\partial \gamma_x}{\partial \alpha} = \frac{(u_1 + u_2) \cdot \sin \alpha}{2L \cos^2 \alpha}, \quad \frac{\partial \gamma_x}{\partial u_1} = \frac{1}{2L \cos \alpha}, \quad \frac{\partial \gamma_x}{\partial u_2} = \frac{1}{2L \cos \alpha}, \quad \frac{\partial \gamma_x}{\partial L} = -\frac{u_1 + u_2}{2L^2 \cos \alpha}.$$

Використавши формулу для знаходження середньої квадратичної похибки та вирази часткових похідних функції $\gamma_x(\alpha, u_1, u_2, L)$, запишемо співвідношення:

$$M_{\gamma_x}^2 = \left[\frac{(u_1 + u_2) \cdot \sin \alpha}{2L \cos^2 \alpha} \right]^2 \cdot m_\alpha^2 + \left[\frac{1}{2L \cos \alpha} \right]^2 \cdot m_{u_1}^2 + \left[\frac{1}{2L \cos \alpha} \right]^2 \cdot m_{u_2}^2 + \left[-\frac{u_1 + u_2}{2L^2 \cos \alpha} \right]^2 \cdot m_L^2.$$

Розкривши дужки та звівши до спільного знаменника, отримуємо:

$$M_{\gamma_x}^2 = \frac{\left[(m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (u_1 + u_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \alpha + m_\alpha^2 \cdot (u_1 + u_2) \cdot \sin^2 \alpha \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \alpha},$$

звідки

$$M_{\gamma_x} = \sqrt{\frac{\left[(m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (u_1 + u_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \alpha + m_\alpha^2 \cdot (u_1 + u_2) \cdot \sin^2 \alpha \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \alpha}} \quad (2.31).$$

Аналогічно виконаємо перетворення для формули (2.28) та формули (2.29).

Знайдемо часткові похідні функції $\gamma_y = \gamma_y(\beta, t_1, t_2, L)$

$$\frac{\partial \gamma_y}{\partial \beta} = \frac{(t_1 + t_2) \cdot \sin \beta}{2L \cos^2 \beta}, \quad \frac{\partial \gamma_y}{\partial t_1} = \frac{1}{2L \cos \beta}, \quad \frac{\partial \gamma_y}{\partial t_2} = \frac{1}{2L \cos \beta}, \quad \frac{\partial \gamma_y}{\partial L} = -\frac{t_1 + t_2}{2L^2 \cos \beta},$$

та перейдемо до середньої квадратичної похибки

$$M_{\gamma_y}^2 = \left[\frac{(t_1 + t_2) \cdot \sin \beta}{2L \cos^2 \beta} \right]^2 \cdot m_\beta^2 + \left[\frac{1}{2L \cos \beta} \right]^2 \cdot m_{t_1}^2 + \left[\frac{1}{2L \cos \beta} \right]^2 \cdot m_{t_2}^2 + \left[-\frac{t_1 + t_2}{2L^2 \cos \beta} \right]^2 \cdot m_L^2,$$

$$M_{\gamma_y}^2 = \frac{\left[(m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (t_1 + t_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \beta + m_\beta^2 \cdot (t_1 + t_2) \cdot \sin^2 \beta \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \beta},$$

звідки отримаємо

$$M_{\gamma_y} = \sqrt{\frac{\left[(m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (t_1 + t_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \beta + m_\beta^2 \cdot (t_1 + t_2) \cdot \sin^2 \beta \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \beta}} \quad (2.32).$$

Знайдемо часткові похідні функції $\gamma_z = \gamma_z(\phi, v_1, v_2, L)$

$$\frac{\partial \gamma_z}{\partial \phi} = \frac{(v_1 + v_2) \cdot \sin \phi}{2L \cos^2 \phi}, \quad \frac{\partial \gamma_z}{\partial v_1} = \frac{1}{2L \cos \phi}, \quad \frac{\partial \gamma_z}{\partial v_2} = \frac{1}{2L \cos \phi}, \quad \frac{\partial \gamma_z}{\partial L} = -\frac{v_1 + v_2}{2L^2 \cos \phi}$$

та запишемо вираз для середньої квадратичної похибки

$$M_{\gamma_z}^2 = \left[\frac{(v_1 + v_2) \cdot \sin \phi}{2L \cos^2 \phi} \right]^2 \cdot m_\phi^2 + \left[\frac{1}{2L \cos \phi} \right]^2 \cdot m_{v_1}^2 + \left[\frac{1}{2L \cos \phi} \right]^2 \cdot m_{v_2}^2 + \left[-\frac{v_1 + v_2}{2L^2 \cos \phi} \right]^2 \cdot m_L^2,$$

$$M_{\gamma_z}^2 = \frac{\left[(m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (v_1 + v_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \phi + m_\phi^2 \cdot (v_1 + v_2) \cdot \sin^2 \phi \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \phi},$$

звідки отримаємо

$$M_{\gamma_z} = \sqrt{\frac{\left[(m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (v_1 + v_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \phi + m_\phi^2 \cdot (v_1 + v_2) \cdot \sin^2 \phi \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \phi}} \quad (2.33).$$

Дилатацію (розширення) визначають за рівністю:

$$\Delta = \frac{(u_2 - u_1)}{L} \cos \alpha + \frac{(t_2 - t_1)}{L} \cos \beta + \frac{(v_2 - v_1)}{L} \cos \phi \quad (2.34).$$

Для знаходження середньої квадратичної похибки визначення дилатації необхідно продиференціювати формулу (2.22) за елементами $\alpha, \beta, \phi, u_1, u_2, t_1, t_2, v_1, v_2, L$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} &= \frac{(u_1 + u_2) \cdot \sin \alpha}{L}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial \beta} = \frac{(t_1 + t_2) \cdot \sin \beta}{L}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial \phi} = \frac{(v_1 + v_2) \cdot \sin \phi}{L}, \\ \frac{\partial \Delta}{\partial u_2} &= \frac{\cos \alpha}{L}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial u_1} = -\frac{\cos \alpha}{L}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial t_2} = \frac{\cos \beta}{L}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial t_1} = -\frac{\cos \beta}{L}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial v_2} = \frac{\cos \phi}{L}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial v_1} = -\frac{\cos \phi}{L}, \\ \frac{\partial \Delta}{\partial L} &= \frac{(u_1 - u_2) \cdot \cos \alpha + (t_1 - t_2) \cdot \cos \beta + (v_1 - v_2) \cdot \cos \phi}{L}. \end{aligned}$$

Перейдемо до запису виразу середньої квадратичної похибки

$$\begin{aligned} M_{\Delta}^2 &= \left[\frac{(u_1 + u_2) \cdot \sin \alpha}{L} \right]^2 \cdot m_{\alpha}^2 + \left[\frac{(t_1 + t_2) \cdot \sin \beta}{L} \right]^2 \cdot m_{\beta}^2 + \left[\frac{(v_1 + v_2) \cdot \sin \phi}{L} \right]^2 \cdot m_{\phi}^2 + \\ &+ \left[\frac{\cos \alpha}{L} \right]^2 \cdot m_{u_2}^2 + \left[-\frac{\cos \alpha}{L} \right]^2 \cdot m_{u_1}^2 + \left[\frac{\cos \beta}{L} \right]^2 \cdot m_{t_2}^2 + \left[-\frac{\cos \beta}{L} \right]^2 \cdot m_{t_1}^2 + \left[\frac{\cos \phi}{L} \right]^2 \cdot m_{v_2}^2 + \\ &+ \left[-\frac{\cos \phi}{L} \right]^2 \cdot m_{v_1}^2 + \left[\frac{(u_1 - u_2) \cdot \cos \alpha + (t_1 - t_2) \cdot \cos \beta + (v_1 - v_2) \cdot \cos \phi}{L} \right]^2 \cdot m_L^2, \end{aligned}$$

спростимо вираз

$$\begin{aligned}
M_{\Delta}^2 = & \left[\frac{m_L^2 \cdot (u_1 - u_2)^2}{L^4} - \frac{(u_1 - u_2)^2 \cdot m_{\alpha}^2 - m_u^2 - m_u^2}{L^2} \right] \cdot \cos^2 \alpha + \\
& + \left[\frac{m_L^2 \cdot (t_1 - t_2)^2}{L^4} - \frac{(t_1 - t_2)^2 \cdot m_{\beta}^2 - m_t^2 - m_t^2}{L^2} \right] \cdot \cos^2 \beta + \\
& + \left[\frac{m_L^2 \cdot (v_1 - v_2)^2}{L^4} - \frac{(v_1 - v_2)^2 \cdot m_{\phi}^2 - m_v^2 - m_v^2}{L^2} \right] \cdot \cos^2 \phi + \\
& + \left[\frac{2m_L^2 \cdot (u_1 - u_2) \cdot [(t_1 - t_2) \cdot \cos \beta + (v_1 - v_2) \cdot \cos \phi]}{L^4} \right] \cdot \cos \alpha + \\
& + \frac{2m_L^2 \cdot (t_1 - t_2) \cdot (v_1 - v_2) \cdot \cos \beta \cdot \cos \phi}{L^4} + \frac{(u_1 - u_2)^2 \cdot m_{\alpha}^2 + (t_1 - t_2)^2 \cdot m_{\beta}^2 + (v_1 - v_2)^2 \cdot m_{\phi}^2}{L^2},
\end{aligned}$$

звідки отримаємо

$$\begin{aligned}
M_{\Delta} = & \sqrt{\frac{m_{\alpha}^2 (u_1 - u_2)^2 \sin^2 \alpha + m_{\phi}^2 (v_1 - v_2)^2 \sin^2 \phi + m_{\beta}^2 (t_1 - t_2)^2 \sin^2 \beta}{L^2}} + \\
& + \frac{(m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2) \cos^2 \alpha + (m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2) \cos^2 \phi + (m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2) \cos^2 \beta}{L^2} \quad (2.35).
\end{aligned}$$

Окрім цього необхідно ще визначити зсув, який можна розрахувати кутом повороту об'єкту в площині,

$$\Theta = \arcsin \sqrt{\frac{\omega^2}{L^2} - \Delta^2} \quad (2.36),$$

де

$$\omega = \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2} \quad (2.37).$$

Так як ω є складовою формули (2.36), знайдемо спочатку її середню квадратичну похибку, виконавши диференціювання формули (2.37):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \omega}{\partial u_2} &= \frac{u_2 - u_1}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}}, & \frac{\partial \omega}{\partial u_1} &= \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}}, \\
\frac{\partial \omega}{\partial t_2} &= \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}}, & \frac{\partial \omega}{\partial t_1} &= \frac{t_1 - t_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}},
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial v_2} = \frac{v_2 - v_1}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}}, \quad \frac{\partial \omega}{\partial v_1} = \frac{v_1 - v_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}},$$

та запишемо вираз

$$\begin{aligned} M_\omega^2 = & \left(\frac{u_2 - u_1}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}} \right)^2 \cdot m_{u_2}^2 + \\ & + \left(\frac{u_1 - u_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}} \right)^2 \cdot m_{u_1}^2 + \\ & + \left(\frac{t_2 - t_1}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}} \right)^2 \cdot m_{t_2}^2 + \left(\frac{t_1 - t_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}} \right)^2 \cdot m_{t_1}^2 + \\ & + \left(\frac{v_2 - v_1}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}} \right)^2 \cdot m_{v_2}^2 + \left(\frac{v_1 - v_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (t_2 - t_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}} \right)^2 \cdot m_{v_1}^2, \end{aligned}$$

виконавши математичні перетворення, отримаємо

$$M_\omega^2 = \frac{(u_1 - u_2)^2 \cdot (m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2) + (v_1 - v_2)^2 \cdot (m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2) + (t_1 - t_2)^2 \cdot (m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2)}{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2 + (t_1 - t_2)^2},$$

звідки

$$M_\omega = \sqrt{\frac{(u_1 - u_2)^2 \cdot (m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2) + (v_1 - v_2)^2 \cdot (m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2) + (t_1 - t_2)^2 \cdot (m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2)}{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2 + (t_1 - t_2)^2}} \quad (2.38).$$

Перейдемо до знаходження виразу для середньої квадратичної похибки обертання. Знайдемо часткові похідні функції $\Theta = \Theta(\omega, L, \Delta)$ для формули (2.36)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial \Delta} &= -\frac{\Delta \cdot L^2}{\sqrt{\omega^2 - \Delta^2} \cdot L^2 \cdot \sqrt{\Delta^2 \cdot L^2 + L^2 - \omega^2}}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial L} = -\frac{\omega^2}{L \cdot \sqrt{\omega^2 - \Delta^2} \cdot L^2 \cdot \sqrt{\Delta^2 \cdot L^2 + L^2 - \omega^2}}, \\ \frac{\partial \Theta}{\partial \omega} &= \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 - \Delta^2} \cdot L^2 \cdot \sqrt{\Delta^2 \cdot L^2 + L^2 - \omega^2}}, \end{aligned}$$

запишемо

$$M_{\Theta}^2 = \left(-\frac{\Delta \cdot L^2}{\sqrt{(\omega^2 - \Delta^2 \cdot L^2)} \cdot \sqrt{\Delta^2 \cdot L^2 + L^2 - \omega^2}} \right) \cdot m_{\Delta}^2 +$$

$$+ \left(-\frac{\omega^2}{L \cdot \sqrt{(\omega^2 - \Delta^2 \cdot L^2)} \cdot \sqrt{\Delta^2 \cdot L^2 + L^2 - \omega^2}} \right) \cdot m_L^2 + \left(\frac{\omega}{\sqrt{(\omega^2 - \Delta^2 \cdot L^2)} \cdot \sqrt{\Delta^2 \cdot L^2 + L^2 - \omega^2}} \right) \cdot m_{\omega}^2.$$

Спростивши вираз

$$M_{\Theta}^2 = \frac{\Delta^2 m_{\Delta}^2 L^6 + \omega^2 \cdot (m_L^2 \cdot \omega^2 + L^2 \cdot m_{\omega}^2)}{L^2 \cdot (\omega^2 - \Delta^2 L^2) \cdot (\Delta^2 L^2 + L^2 - \omega^2)},$$

отримаємо

$$M_{\Theta} = \sqrt{\frac{\Delta^2 m_{\Delta}^2 L^6 + \omega^2 \cdot (m_L^2 \cdot \omega^2 + L^2 \cdot m_{\omega}^2)}{L^2 \cdot (\omega^2 - \Delta^2 L^2) \cdot (\Delta^2 L^2 + L^2 - \omega^2)}} \quad (2.39).$$

Для знаходження направляючих косинусів нормалі площини обертання необхідно написати рівняння безпосередньо самої площини, навколо якої здійснюється обертання:

$$AX + BY + CZ + D = 0 \quad (2.40),$$

де

$$A = \cos \alpha \cos \beta' - \cos \beta \cos \alpha', \quad B = \cos \beta \cos \varphi' - \cos \varphi \cos \beta'$$

$$C = \cos \varphi \cos \alpha' - \cos \alpha \cos \varphi', \quad D = const \quad (2.41).$$

Направляючі косинуси нормалі площини обертання визначають з формул:

$$m = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2.42),$$

$$n = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2.43),$$

$$l = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2.44).$$

Перетворюючи формули 2.41 з врахуванням виразів:

$$\Delta X' = \Delta X + u_2 - u_1, \Delta Y' = \Delta Y + v_2 - v_1, \Delta Z' = \Delta Z + t_2 - t_1 \quad (2.45),$$

компоненти формул 2.42-2.44 будуть мати такий вигляд:

$$A = (v_2 - v_1) \cos \alpha - (u_2 - u_1) \cos \beta \quad (2.46),$$

$$B = (t_2 - t_1) \cos \beta - (v_2 - v_1) \cos \phi \quad (2.47),$$

$$C = (u_2 - u_1) \cos \beta - (t_2 - t_1) \cos \alpha \quad (2.48).$$

Знайдемо вирази середньої квадратичної похибки для формул (2.46-2.48). Для виразу (2.46) матимемо:

$$\frac{\partial A}{\partial \alpha} = (v_1 - v_2) \cdot \sin \alpha, \quad \frac{\partial A}{\partial v_2} = \cos \alpha, \quad \frac{\partial A}{\partial v_1} = -\cos \alpha, \quad \frac{\partial A}{\partial \beta} = (u_2 - u_1) \cdot \sin \beta,$$

$$\frac{\partial A}{\partial u_2} = -\cos \beta, \quad \frac{\partial A}{\partial u_1} = \cos \beta,$$

$$M_A^2 = ((v_1 - v_2) \cdot \sin \alpha)^2 \cdot m_\alpha^2 + (\cos \alpha)^2 \cdot m_{v_2}^2 + (-\cos \alpha)^2 \cdot m_{v_1}^2 + \\ + ((u_2 - u_1) \cdot \sin \beta)^2 \cdot m_\beta^2 + (-\cos \beta)^2 \cdot m_{u_2}^2 + (\cos \beta)^2 \cdot m_{u_1}^2,$$

$$M_A^2 = -\left[(v_1 - v_2)^2 \cdot m_\alpha^2 - m_{v_2}^2 - m_{v_1}^2 \right] \cdot \cos^2 \alpha - \left[(u_1 - u_2)^2 \cdot m_\beta^2 - m_{u_2}^2 - m_{u_1}^2 \right] \cdot \cos^2 \beta + \\ + (v_1 - v_2)^2 \cdot m_\alpha^2 + (u_1 - u_2)^2 \cdot m_\beta^2,$$

$$m_A = \sqrt{\left(-\left[(v_1 - v_2)^2 \cdot m_\alpha^2 - m_{v_2}^2 - m_{v_1}^2 \right] \cdot \cos^2 \alpha - \left[(u_1 - u_2)^2 \cdot m_\beta^2 - m_{u_2}^2 - m_{u_1}^2 \right] \cdot \cos^2 \beta + \right.} \\ \left. + (v_1 - v_2)^2 \cdot m_\alpha^2 + (u_1 - u_2)^2 \cdot m_\beta^2 \right)} \quad (2.49).$$

Для виразу (2.47) отримаємо:

$$\frac{\partial B}{\partial \beta} = (t_1 - t_2) \cdot \sin \beta, \quad \frac{\partial B}{\partial t_2} = \cos \beta, \quad \frac{\partial B}{\partial t_1} = -\cos \beta, \quad \frac{\partial B}{\partial \phi} = (v_2 - v_1) \cdot \sin \phi,$$

$$\frac{\partial B}{\partial v_2} = -\cos \phi, \quad \frac{\partial B}{\partial v_1} = \cos \phi,$$

$$M_B^2 = ((t_1 - t_2) \cdot \sin \beta)^2 \cdot m_\beta^2 + (\cos \beta)^2 \cdot m_{t_2}^2 + (-\cos \beta)^2 \cdot m_{t_1}^2 + ((v_2 - v_1) \cdot \sin \phi)^2 \cdot m_\phi^2 + \\ + (-\cos \phi)^2 \cdot m_{v_2}^2 + (\cos \phi)^2 \cdot m_{v_1}^2,$$

$$\begin{aligned}
M_B^2 = & -\left[(t_1 - t_2)^2 \cdot m_\beta^2 - m_{t_2}^2 - m_{t_1}^2\right] \cdot \cos^2 \beta - \left[(v_1 - v_2)^2 \cdot m_\phi^2 - m_{v_2}^2 - m_{v_1}^2\right] \cdot \cos^2 \phi + \\
& + (t_1 - t_2)^2 \cdot m_\beta^2 + (v_1 - v_2)^2 \cdot m_\phi^2, \\
m_B = & \sqrt{\left(-\left[(t_1 - t_2)^2 \cdot m_\beta^2 - m_{t_2}^2 - m_{t_1}^2\right] \cdot \cos^2 \beta - \left[(v_1 - v_2)^2 \cdot m_\phi^2 - m_{v_2}^2 - m_{v_1}^2\right] \cdot \cos^2 \phi + \right.} \\
& \left. + (t_1 - t_2)^2 \cdot m_\beta^2 + (v_1 - v_2)^2 \cdot m_\phi^2\right)
\end{aligned} \tag{2.50}.$$

Для виразу (2.48) отримаємо:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C}{\partial \phi} = (u_1 - u_2) \cdot \sin \phi, \quad \frac{\partial C}{\partial u_2} = \cos \phi, \quad \frac{\partial C}{\partial u_1} = -\cos \phi, \quad \frac{\partial C}{\partial \alpha} = (t_2 - t_1) \cdot \sin \alpha, \\
\frac{\partial C}{\partial t_2} = -\cos \alpha, \quad \frac{\partial C}{\partial t_1} = \cos \alpha,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_C^2 = & \left((u_1 - u_2) \cdot \sin \phi\right)^2 \cdot m_\phi^2 + (\cos \phi)^2 \cdot m_{u_2}^2 + (-\cos \phi)^2 \cdot m_{u_1}^2 + \left((t_2 - t_1) \cdot \sin \alpha\right)^2 \cdot m_\alpha^2 + \\
& + (-\cos \alpha)^2 \cdot m_{t_2}^2 + (\cos \alpha)^2 \cdot m_{t_1}^2,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_C^2 = & -\left[(u_1 - u_2)^2 \cdot m_\phi^2 - m_{u_2}^2 - m_{u_1}^2\right] \cdot \cos^2 \phi - \left[(t_1 - t_2)^2 \cdot m_\alpha^2 - m_{t_2}^2 - m_{t_1}^2\right] \cdot \cos^2 \alpha + \\
& + (u_1 - u_2)^2 \cdot m_\phi^2 + (t_1 - t_2)^2 \cdot m_\alpha^2,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_C = & \sqrt{\left(-\left[(u_1 - u_2)^2 \cdot m_\phi^2 - m_{u_2}^2 - m_{u_1}^2\right] \cdot \cos^2 \phi - \left[(t_1 - t_2)^2 \cdot m_\alpha^2 - m_{t_2}^2 - m_{t_1}^2\right] \cdot \cos^2 \alpha + \right.} \\
& \left. + (u_1 - u_2)^2 \cdot m_\phi^2 + (t_1 - t_2)^2 \cdot m_\alpha^2\right)
\end{aligned} \tag{2.51}.$$

Отримавши вирази (2.49-2.51) для A, B, C , знайдемо формули середньої квадратичної похибки для направляючих косинусів нормалі площини обертання, формули (2.42-2.44).

Продиференціюємо вираз (2.42) та отримаємо:

$$\frac{\partial m}{\partial A} = \frac{B^2 + C^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}}, \quad \frac{\partial m}{\partial B} = -\frac{A \cdot B}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}}, \quad \frac{\partial m}{\partial C} = -\frac{A \cdot C}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}},$$

$$\begin{aligned}
M_m^2 &= \left(\frac{B^2 + C^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_A^2 + \left(-\frac{A \cdot B}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_B^2 + \\
&+ \left(-\frac{A \cdot C}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_C^2, \\
M_m^2 &= \frac{A^2 \cdot (B^2 \cdot m_B^2 + C^2 \cdot m_C^2) + m_A^2 \cdot (B^2 + C^2)^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^3}, \\
M_m &= \sqrt{\frac{A^2 \cdot (B^2 \cdot m_B^2 + C^2 \cdot m_C^2) + m_A^2 \cdot (B^2 + C^2)^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^3}} \quad (2.52).
\end{aligned}$$

Для виразу (2.43) отримаємо:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial n}{\partial A} &= -\frac{A \cdot B}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}}, \quad \frac{\partial n}{\partial B} = \frac{A^2 + C^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}}, \quad \frac{\partial n}{\partial C} = -\frac{B \cdot C}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}}, \\
M_n^2 &= \left(\frac{A \cdot B}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_A^2 + \left(\frac{A^2 + C^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_B^2 + \\
&+ \left(-\frac{B \cdot C}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_C^2, \\
M_n^2 &= \frac{B^2 \cdot (A^2 \cdot m_A^2 + C^2 \cdot m_C^2) + m_B^2 \cdot (A^2 + C^2)^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^3}, \\
M_n &= \sqrt{\frac{B^2 \cdot (A^2 \cdot m_A^2 + C^2 \cdot m_C^2) + m_B^2 \cdot (A^2 + C^2)^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^3}} \quad (2.53).
\end{aligned}$$

Для виразу (2.44) отримаємо:

$$\frac{\partial l}{\partial A} = -\frac{A \cdot C}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}}, \quad \frac{\partial l}{\partial B} = -\frac{B \cdot C}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}}, \quad \frac{\partial l}{\partial C} = \frac{A^2 + B^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}},$$

$$M_l^2 = \left(\frac{A \cdot C}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_A^2 + \left(-\frac{B \cdot C}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_B^2 +$$

$$+ \left(\frac{A^2 + B^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^{3/2}} \right)^2 \cdot m_C^2,$$

$$M_l^2 = \frac{C^2 \cdot (A^2 \cdot m_A^2 + B^2 \cdot m_B^2) + m_C^2 \cdot (A^2 + B^2)^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^3},$$

$$M_l = \sqrt{\frac{C^2 \cdot (A^2 \cdot m_A^2 + B^2 \cdot m_B^2) + m_C^2 \cdot (A^2 + B^2)^2}{(A^2 + B^2 + C^2)^3}} \quad (2.54).$$

Отримані формули (2.31-2.33, 2.35, 2.39, 2.52-2.54) дозволяють розрахувати попередню точність визначення параметрів деформацій напірного трубопроводу Тербле-Ріцької ГЕС. Даний трубопровід складається з п'яти прогонів, що опираються на 6 опор, на кожній з яких є пункт мережі. На рис 2.12 представлена схема їх розташування. Для дослідження деформаційних процесів необхідно використовувати високоточні тахеометри, тому наші розрахунки виконано для високоточних роботизованих тахеометрів TPS-1201 та TM-30 фірми Leica Geosystems [136]. Вихідними даними для розрахунку попередньої точності визначення параметрів деформацій напірних трубопроводів були:

- технічні характеристики тахеометрів (див. табл. 2.7);
- довжини прогонів (L), та величини кутів направляючих косинусів (α, β, φ) (табл. 2.8);
- проекції опор напірного трубопроводу (u, t, v) на осі (X, Y, Z) (табл. 2.9);

- точність визначення проєкцій опор напірного трубопроводу (m_u, m_t, m_v) на координатні осі (X, Y, Z) (табл. 2.10).

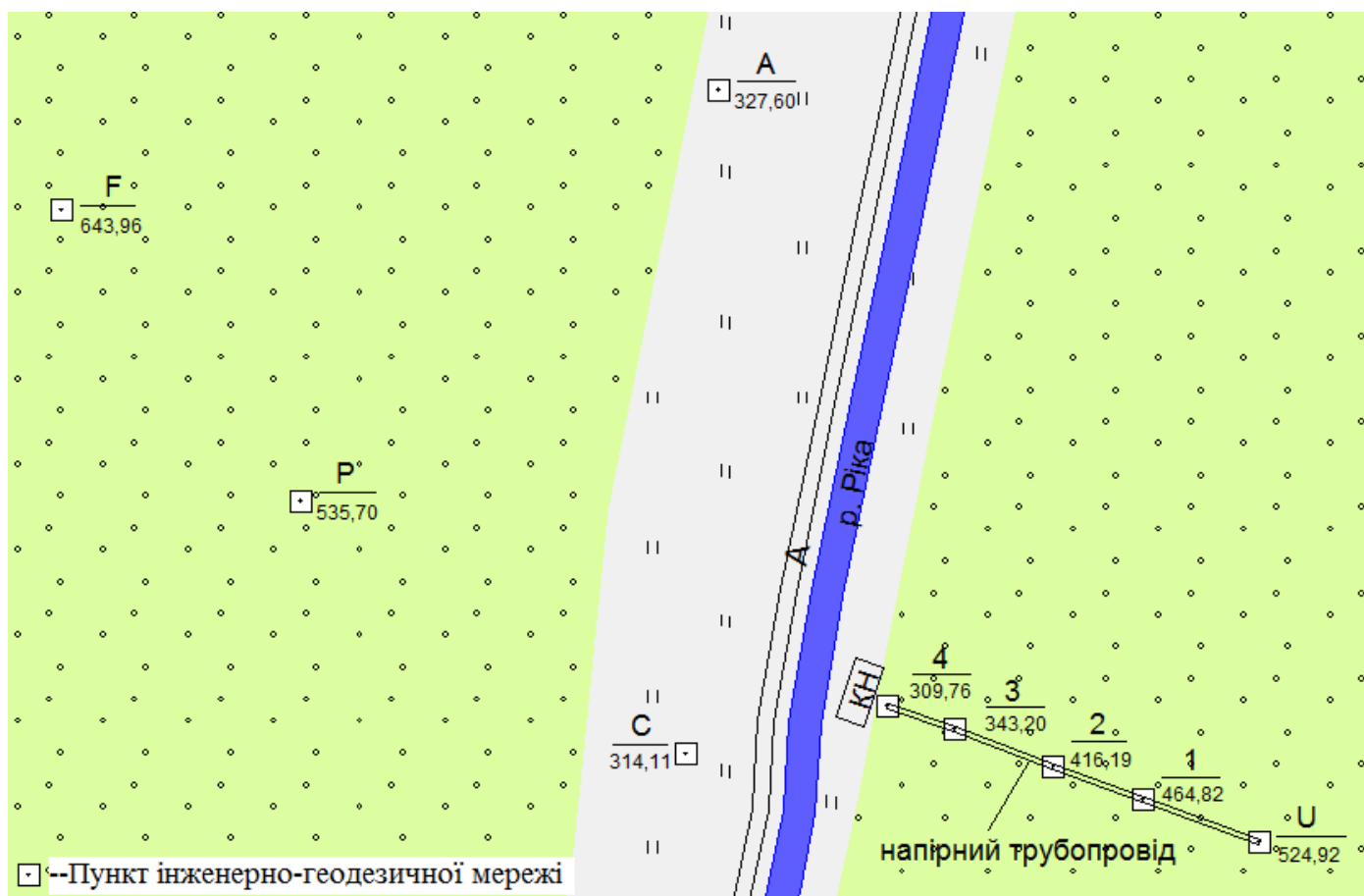


Рис. 2.12 Схема мережі пунктів для дослідження деформацій напірного трубопроводу Теремле-Ріцької ГЕС

Таблиця 2.7

Технічні характеристики високоточних тахеометрів ТМ-30 та TPS-1201 фірми Leica Geosystems

Модель тахеометра	Точність виміру кута	Точність виміру віддалі на призму
ТМ-30	0,5''	0,6 мм + 1ppm
TPS-1201	1''	2 мм + 2ppm

Проекції опор напірного трубопроводу на координатні осі X,Y,Z

№ опори	u , мм	t , мм	v , мм
4	-6,8	-6,8	23,3
3	6,5	18,1	10,4
2	1,6	6,3	-13,9
1	-14,0	6,8	17,4
D	-8,7	-1,6	11,8
U	-26,3	-4,1	21,1

Таблиця 2.9

Довжини прогонів та кути направляючих косинусів між сусідніми опорами

Лінія	L , мм	α , рад	β , рад	ϕ , рад
4-3	74360,06	1,27336	2,58638	2,02433
3-2	122756,91	1,28863	2,42205	2,21097
2-1	101971,22	1,25852	2,54035	2,06573
1-D	12731,51	1,30966	2,37118	2,27418
D-U	130378,13	1,26325	2,54984	2,05843

Таблиця 2.10

Точність визначення проекцій опор напірного трубопроводу на координатні осі X,Y,Z тахеометрами ТМ-30 та TPS-1201

№ опори	TPS-1201			ТМ-30		
	m_u , мм	m_t , мм	m_v , мм	m_u , мм	m_t , мм	m_v , мм
4	4,441	5,576	11,824	2,221	2,788	5,912
3	4,763	5,516	15,770	2,382	2,758	7,885
2	5,473	5,819	27,047	2,736	2,909	13,524
1	6,321	6,221	43,330	3,16	3,111	21,665
D	6,456	6,302	47,080	3,228	3,151	23,54
U	8,291	6,756	93,041	4,145	3,378	46,52

Виходячи з отриманих вихідних даних, формули для оцінки точності можна дещо спростити, а саме:

1. “Чистий” зсув:

Елементи формул (2.31-2.33) $\frac{m_\alpha^2 \cdot (u_1 + u_2) \cdot \sin^2 \alpha \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \alpha}$, $\frac{m_\beta^2 \cdot (v_1 + v_2) \cdot \sin^2 \beta \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \beta}$, $\frac{m_\phi^2 \cdot (t_1 + t_2) \cdot \sin^2 \phi \cdot L^2}{4L^4 \cos^4 \phi}$ складають $1 \cdot 10^{-10}\%$ від отриманих значень обчислення

апріорної точності “чистого” зсуву, за рахунок того, що $m_\alpha^2, m_\phi^2, m_\beta^2$ є дуже малими величинами. Таким чином, спрощені формули будуть мати такий вигляд:

$$M_{\gamma_x} = \sqrt{\frac{\left[(m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (u_1 + u_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \alpha}{4L^4 \cos^4 \alpha}} \quad (2.55),$$

$$M_{\gamma_y} = \sqrt{\frac{\left[(m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (v_1 + v_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \beta}{4L^4 \cos^4 \beta}} \quad (2.56),$$

$$M_{\gamma_z} = \sqrt{\frac{\left[(m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2) \cdot L^2 + m_L^2 \cdot (t_1 + t_2)^2 \right] \cdot \cos^2 \phi}{4L^4 \cos^4 \phi}} \quad (2.57).$$

2. Дилатація:

Під час обчислень встановлено, що $m_\alpha^2 (u_1 - u_2)^2 \sin^2 \alpha + m_\phi^2 (v_1 - v_2)^2 \sin^2 \phi + m_\beta^2 (t_1 - t_2)^2 \sin^2 \beta$ становить $0,054\%$ від отриманого значення точності дилатації (формула 2.35), що дає змогу ним знехтувати. Отже, спрощена формула для оцінки точності дилатації буде мати такий вигляд:

$$M_\Delta = \sqrt{\frac{\left(m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2 \right) \cos^2 \alpha + \left(m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2 \right) \cos^2 \phi + \left(m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2 \right) \cos^2 \beta}{L^2}} \quad (2.58).$$

3. Направляючі вектори площини обертання:

Формули (2.49-2.51) для визначення m_A, m_B, m_C можна спростити за рахунок

того, що $(v_1 - v_2)^2 \cdot m_\alpha^2 + (u_1 - u_2)^2 \cdot m_\beta^2$, $(t_1 - t_2)^2 \cdot m_\beta^2 + (v_1 - v_2)^2 \cdot m_\phi^2$,

$(u_1 - u_2)^2 \cdot m_\phi^2 + (t_1 - t_2)^2 \cdot m_\alpha^2$ складає $6,633 \cdot 10^{-6}\%$ від їх обчислених значень, а, отже, їх можна не розраховувати. Формули набудуть такого вигляду:

$$m_A = \sqrt{(-[(v_1 - v_2)^2 \cdot m_\alpha^2 - m_{v_2}^2 - m_{v_1}^2] \cdot \cos^2 \alpha - [(u_1 - u_2)^2 \cdot m_\beta^2 - m_{u_2}^2 - m_{u_1}^2] \cdot \cos^2 \beta)} \quad (2.59),$$

$$m_B = \sqrt{(-[(t_1 - t_2)^2 \cdot m_\beta^2 - m_{t_2}^2 - m_{t_1}^2] \cdot \cos^2 \beta - [(v_1 - v_2)^2 \cdot m_\phi^2 - m_{v_2}^2 - m_{v_1}^2] \cdot \cos^2 \phi)} \quad (2.60),$$

$$m_C = \sqrt{(-[(u_1 - u_2)^2 \cdot m_\phi^2 - m_{u_2}^2 - m_{u_1}^2] \cdot \cos^2 \phi - [(t_1 - t_2)^2 \cdot m_\alpha^2 - m_{t_2}^2 - m_{t_1}^2] \cdot \cos^2 \alpha)} \quad (2.61).$$

Зауважимо, що для розрахунку оцінки точності ми послідовно умовно розділили трубопровід на п'ять частин відповідно до опор, на яких розташований трубопровід, та виконали розрахунки для кожної частини трубопроводу. Результати наведені у таблицях 2.11 та 2.12.

Таблиця 2.11

Оцінка точності параметрів деформацій напірного трубопроводу Теремле-Ріцької ГЕС для тахеометра TPS-1201

Лінія	$M_\Delta, 10^{-4}$	$M_{\gamma_x}, 10^{-4}$	$M_{\gamma_y}, 10^{-4}$	$M_{\gamma_z}, 10^{-4}$	$M_\Theta, \text{рад}$	M_m	M_n	M_l
4-3	1,489	1,494	1,560	1,204	0,0001664	0,256	0,111	0,166
3-2	1,609	1,061	1,696	0,547	0,0004385	0,582	1,234	0,490
2-1	2,547	1,223	2,766	0,581	0,0007076	1,033	0,413	0,641
1-D	32,940	13,740	35,020	5,377	0,0160000	5,844	6,799	3,327
D-U	3,801	1,331	4,818	0,756	0,0004368	1,306	2,642	1,092

Таблиця 2.12

Оцінка точності параметрів деформацій напірного трубопроводу Теремле-Ріцької ГЕС для тахеометра ТМ-30

Лінія	$M_\Delta, 10^{-4}$	$M_{\gamma_x}, 10^{-5}$	$M_{\gamma_y}, 10^{-4}$	$M_{\gamma_z}, 10^{-5}$	$M_\Theta, \text{рад}$	M_m	M_n	M_l
4-3	0,7447	7,472	0,7798	6,018	0,00008319	0,128	0,056	0,083
3-2	0,8046	5,307	0,8478	2,733	0,00021931	0,291	0,617	0,245
2-1	1,2450	6,671	1,5190	4,397	0,00028812	0,517	0,207	0,320
1-D	16,4700	68,710	17,5100	26,890	0,00791801	2,922	3,399	1,663
D-U	1,9000	6,656	2,4090	3,781	0,00021840	0,653	1,321	0,546

Отримані формули для визначення оцінки точності параметрів деформацій напірних трубопроводів можна використовувати для будь-яких ГЕС такого типу. Використання електронних тахеометрів на об'єктах лінійного типу дало можливість визначати параметри деформацій на порядок вищий ніж самі деформації. Точність визначення деформацій залежить від геометричних параметрів елементів засічок та вихідних даних, однак, якщо з результатів спостережень усунути систематичні похибки, то отримані результати покращаться. Досягнути таких результатів дозволить використати модифікований параметричний метод врівноваження інженерно-геодезичних мереж.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Виконано теоретичне обґрунтування модифікованого параметричного методу опрацювання інженерно-геодезичних мереж та отримано відповідні рівняння поправок для ГНСС, лінійно-кутових вимірів та тригонометричного нівелювання.

2. На основі методу статистичних випробувань доведено переваги модифікованого параметричного методу порівняно з класичним параметричним методом опрацювання інженерно-геодезичних мереж залежно від жорсткості мереж, величин систематичних і випадкових похибок, кількості пунктів і конфігурацій мереж. Встановлено формули для розрахунку ефективності модифікованого параметричного методу порівняно з класичним параметричним залежно від кількості пунктів, жорсткості та розмірів мереж, величини систематичних і випадкових похибок. Встановлено, що із збільшенням кількості пунктів у мережі та її жорсткості ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження порівняно з класичним параметричним зростає.

3. Вперше виведено формули для оцінки точності визначення деформаційних параметрів прогонів напірних трубопроводів ГЕС залежно від точності геодезичних вимірів.

4. За результатами експериментальних досліджень на Теребле-Ріцькій ГЕС встановлено, що точність визначення деформацій є на порядок вища ніж величина самих деформацій. Точність визначення деформацій залежить від конфігурації напірного трубопроводу, схеми вимірів, точності вимірів та вихідних даних.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВРІВНОВАЖЕННЯ МЕРЕЖ

3.1 МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВРІВНОВАЖЕННЯ ГНСС-МЕРЕЖ

У сучасній геодезії метод ГНСС-спостережень широко застосовують для різного роду досліджень. Однією із сфер застосування є моніторинг за деформаціями інженерних споруд, а особливо об'єктів ГЕС, тому важливим є отримання результатів високої точності. Для підвищення точності результатів ГНСС-спостережень необхідно зменшити вплив систематичних похибок, які виникають під час одночасних вимірів. Існує велика кількість методів та способів усунення систематичних похибок з ГНСС-вимірів, але незважаючи на це, їх вплив залишається суттєвим та в значній мірі впливає на результати опрацювання ГНСС-вимірів. Для зменшення систематичних похибок нами розроблений модифікований параметричний метод врівноваження ГНСС-мереж [44, 142, 144].

Виходячи з вищезазначеного, доцільно дослідити ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження ГНСС-вимірів для мереж, які мають задовільні умови відкритості горизонту (кут відсічки супутників становив 10^0 , а тривалість спостережень обмежена 12-ма годинами). Для цього нами вибрана мережа, що складається з 8-ми перманентних станцій (рис. 3.1), які розташовані на південному заході США (південна Каліфорнія) поблизу узбережжя Тихого океану. На кожному пункті мережі встановлені двочастотні ГНСС-приймачі, та частота спостережень становить 15 секунд. Мережа складається з станцій: p181, MONB, p222, p228, p229, p230, p248, p262. Вхідними даними для обчислення векторів та врівноваження мереж були RINEX-файли результатів ГНСС-вимірів на цих станціях, які знаходяться у вільному доступі на сайті SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center [39]), а також значення точних ефемерид.

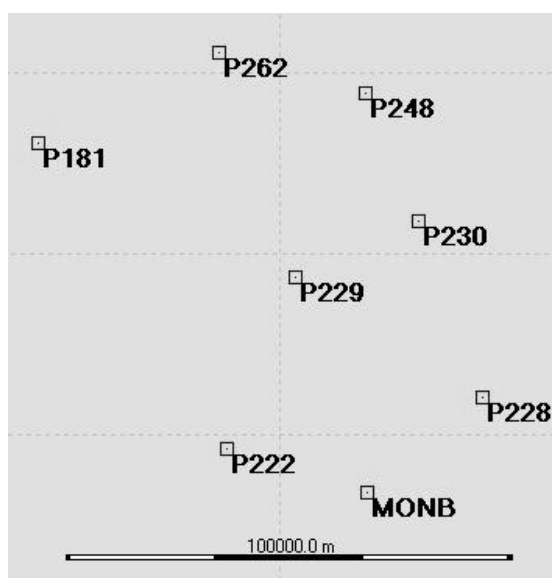


Рис. 3.1 Схема мережі ГНСС станцій

Схема вимірів для мережі створена з комбінації усіх можливих трикутників, утворених трьома одночасно вимірними векторами. Виміри векторів кожного трикутника проводили в іншу добу, таким чином період вимірів складав 56 днів. Календарний графік вимірів представлено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Календарний графік вимірів для мереж I та II

№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.04.2014	p181, p262, p248	2	2.04.2014	p181, p262, p230	3	3.04.2014	p181, p262, P228	4	4.04.2014	p181, p262, MONB
5	5.04.2014	p181, p262, P222	6	6.04.2014	p181, p262, p229	7	7.04.2014	p181, p248, p230	8	8.04.2014	p181, p248, P228
9	9.04.2014	p181, p248, MONB	10	10.04.2014	p181, p248, P222	11	11.04.2014	p181, p248, p229	12	12.04.2014	p181, p230, P228
13	13.04.2014	p181, p230, MONB	14	14.04.2014	p181, p230, P222	15	15.04.2014	p181, p230, p229	16	16.04.2014	p181, P228, MONB
17	17.04.2014	p181, P228, P222	18	18.04.2014	p181, P228, p229	19	19.04.2014	p181, MONB, P222	20	20.04.2014	p181, MONB, p229
21	21.04.2014	p181, P222, p229	22	22.04.2014	p262, p248, p230	23	23.04.2014	p262, p248, P228	24	24.04.2014	p262, p248, MONB
25	25.04.2014	p262, p248, P222	26	26.04.2014	p262, p248, p229	27	27.04.2014	p262, p230, P228	28	28.04.2014	p262, p230, MONB
29	29.04.2014	p262, p230, P222	30	30.04.2014	p262, p230, p229	31	1.05.2014	p262, P228, MONB	32	2.05.2014	p262, P228, P222

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
33	31.05.2014	p262, P228, p229	34	4.05.2014	p262, MONB, P222	35	5.05.2014	p262, MONB, p229	36	6.05.2014	p262, P222, p229
37	7.05.2014	p248, p230, P228	38	8.05.2014	p248, p230, MONB	39	9.05.2014	p248, p230, P222	40	10.05.2014	p248, p230, p229
41	11.05.2014	p248, P228, MONB	42	12.05.2014	p248, P228, P222	43	13.05.2014	p248, P228, p229	44	14.05.2014	p248, MONB, P222
45	15.05.2014	p248, MONB, p229	46	16.05.2014	p248, P222, p229	47	17.05.2014	p230, P228, MONB	48	18.05.2014	p230, P228, P222
49	19.05.2014	p230, P228, p229	50	20.05.2014	p230, MONB, P222	51	21.05.2014	p230, MONB, p229	52	22.05.2014	p230, P222, p229
53	23.05.2014	P228, MONB, P222	54	24.05.2014	P228, MONB, p229	55	25.05.2014	P228, P222, p229	56	26.05.2014	MONB, P222, p229

Особливістю порівняння результатів врівноваження мережі є те, що обчислення векторів виконували двічі: один раз у програмному пакеті LGO, другий – у програмному пакеті TBC. Для визначення точності координат пунктів та встановлення переваг і недоліків, отриманих за результатами обох методів, необхідно володіти достовірними «істинними» координатами пунктів. За істинні координати пунктів приймалися врівноважені координати, визначені з опрацювання довготривалих рядів спостережень з центру SOPAC, редуковані на середню епоху вимірів [39].

Врівноваження виконували модифікованим параметричним та класичним параметричним методами. За координати першого пункту мережі приймалися координати визначені центром SOPAC, координати решти пунктів були отримані за результатами врівноваження. На основі отриманих координат з врівноважених мереж визначено їх різниці з координатами відповідних пунктів, визначених центром SOPAC. Ці різниці визначені для класичного параметричного та модифікованого параметричного методів і трансформовані на площину Універсальної проєкції Меркатора. Різниці, визначені відносно координат центру SOPAC, можна інтерпретувати як помилки визначення координат пунктів за результатами врівноваження. Тому далі ці різниці будемо називати помилками визначених координат відповідним методом врівноваження. Результати визначення помилок координат пунктів δ_x , δ_y , δ_h для мережі (вектори обчислені в програмному пакеті

LGO) двома методами врівноваження представлено в таблиці 3.2. У передостанньому рядку таблиці наведена сума, а в останньому рядку середнє значення відповідних помилок. У колонках 8 і 9 приведені помилки кожного з пунктів в плані, а у колонках 10 і 11 у просторі. У таблиці 3.3 представлена апостеріорна оцінка точності визначених координат пунктів за результатами врівноваження модифікованим параметричним та класичним параметричним методами. В останньому рядку приведені середні квадратичні похибки визначення координат пунктів.

Результати опрацювання мережі (вектори обчислені в програмному пакеті LGO) представлені в таблицях 3.2 та 3.3 і рисунках 3.2а-3.2д. З рисунків 3.2а, 3.2б та 3.2в і таблиці 3.2 видно, що помилки визначених координат модифікованим параметричним методом є значно меншими ніж помилки у координатах, визначених класичним методом для осей x і y , окрім пункту 3 для осі x , а по осі h вони майже рівні. Зміна помилок визначення координат у плані і просторі представлені на рисунках 3.2г і 3.2д. Слід зазначити, що помилки, отримані модифікованим параметричним методом, є меншими ніж помилки, визначені з врівноваження класичним параметричним методом. Ефективність запропонованого методу становить 15% у плані і 4% у просторі.

Таблиця 3.2

**Помилки координат пунктів мережі, визначені
модифікованим параметричним і класичним параметричним методами
(вектори обчислені в програмному пакеті LGO)**

№ пункту	δ_x , мм		δ_y , мм		δ_h , мм		$\delta_{план}$, мм		$\delta_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	-8,0	-27,8	3,7	18,6	15,9	38,2	8,8	33,5	18,2	50,8
3	10,4	-1,6	-0,2	-2,1	10,5	39,9	10,4	2,6	14,8	39,9
4	19,8	18,7	-5,4	-9,5	-15,2	11,8	20,6	21,0	25,6	24,1
5	18,1	23,0	-5,6	-9,3	-42,8	-31,3	18,9	24,8	46,8	39,9
6	7,9	13,2	-2,3	-6,2	-31,5	-20,7	8,2	14,6	32,6	25,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	-8,2	-3,7	-8,0	-6,7	-122,6	-96,8	11,5	7,7	123,1	97,1
8	-29,3	-26,3	19,7	17,0	-3,4	-5,4	35,3	31,3	35,5	31,7
$ \Sigma $	101,7	114,4	44,9	69,2	241,9	244,1	113,7	135,4	296,5	308,9
серед	14,5	16,3	6,4	9,9	34,6	34,9	16,2	19,3	42,4	44,1

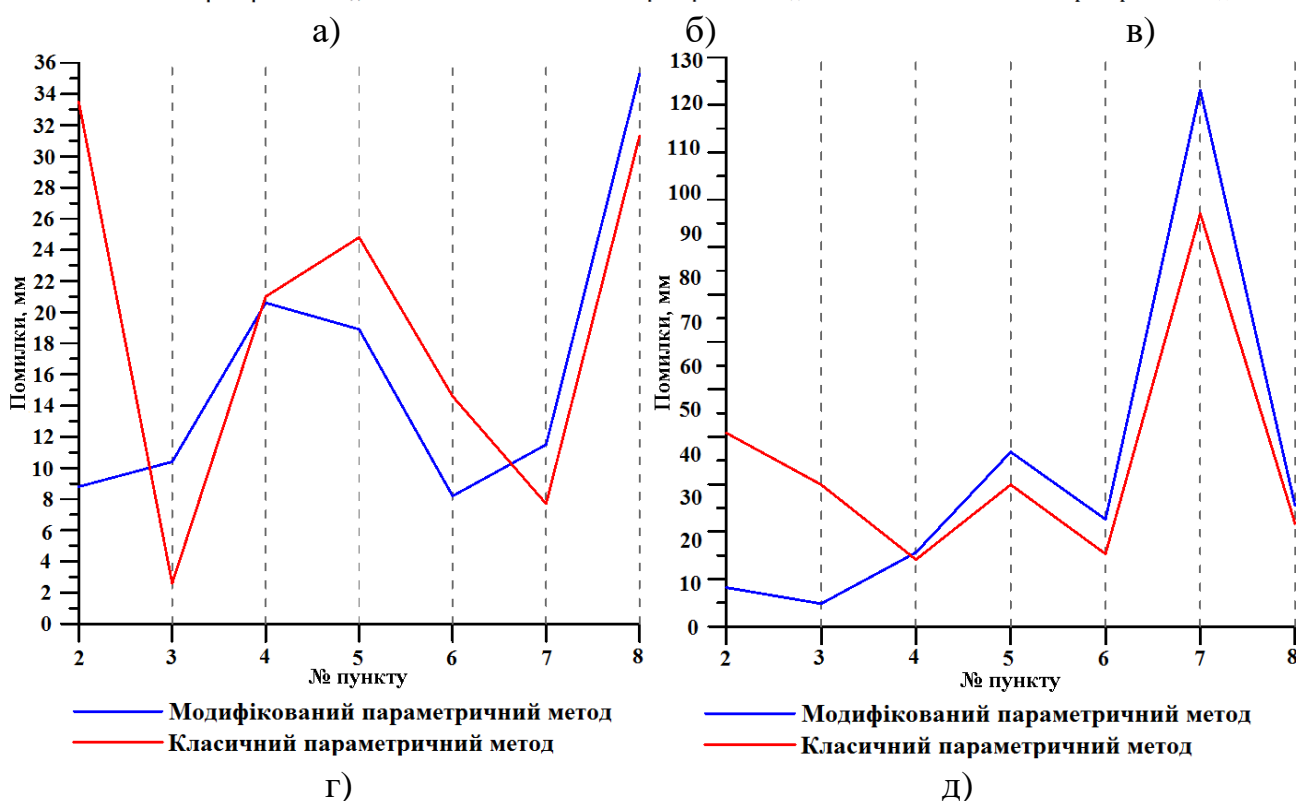
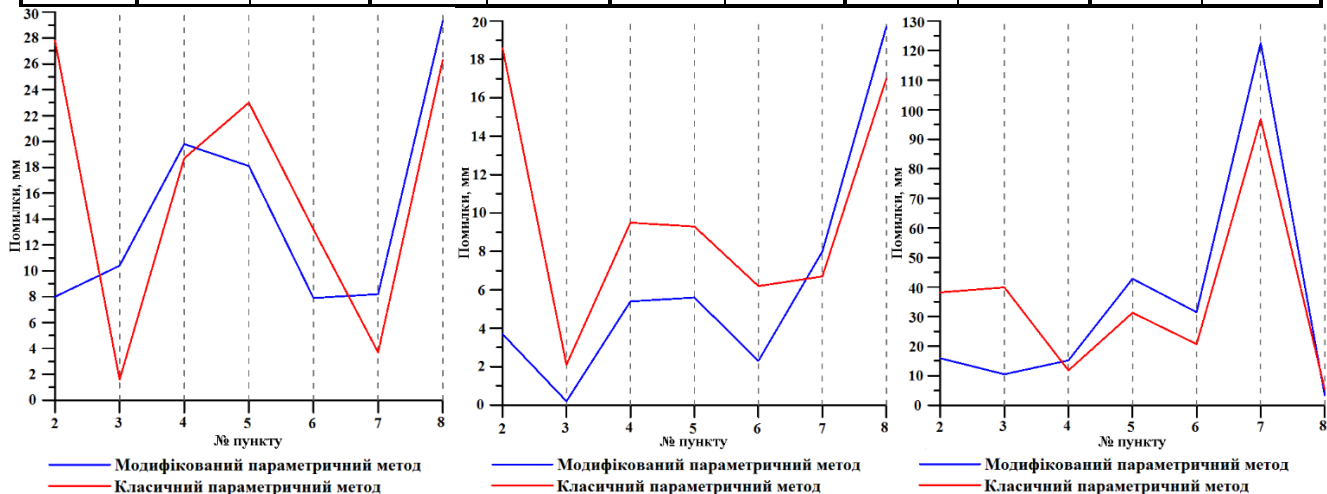


Рис. 3.2 Зміна помилок визначення координат пунктів модифікованим

параметричним та класичним параметричним методами

(а. Помилки δ_x ; б. Помилки δ_y ; в. Помилки δ_h ;

г. Помилки в плані $\delta_{план}$; д. Просторові помилки $\delta_{прост}$)

Результати дослідження апостеріорної оцінки точності визначення координат двома методами представлено у таблиці 3.3. Порівнявши середні середньоквадратичні похибки та помилки визначених координат пунктів мережі, для яких вектори обчислені в програмному пакеті LGO, можна стверджувати, що для модифікованого параметричного методу похибки є меншими за помилки на 20%, а для класичного параметричного є меншими на 60%, що, в свою чергу, підтверджує присутність систематичних похибок.

Таблиця 3.3

**Середні квадратичні похибки координат пунктів визначені
модифікованим параметричним і класичним параметричним методами
(вектори обчислені в програмному пакеті LGO)**

№ пункту	m_x , мм		m_y , мм		m_h , мм		$m_{\text{план}}$, мм		$m_{\text{прос}}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	9,7	1,1	8,2	8,7	21,5	21,2	12,7	8,7	25,0	23,0
3	10,7	1,2	4,3	5,1	23,5	23,1	11,6	5,3	26,2	23,7
4	11,5	1,2	3,9	4,9	22,3	20,2	12,1	5,0	25,4	20,8
5	11,2	1,0	4,2	5,3	24,9	22,4	12,0	5,4	27,6	23,0
6	11,4	1,1	4,4	5,5	23,5	15,8	12,2	5,6	26,5	16,7
7	11,8	1,1	6,3	5,0	28,2	22,6	13,4	5,1	31,2	23,2
8	15,9	1,1	10,3	5,4	31,4	20,5	19,0	5,5	36,7	21,2
серед	11,7	1,1	5,9	5,7	25,1	20,8	13,3	5,8	28,4	21,7

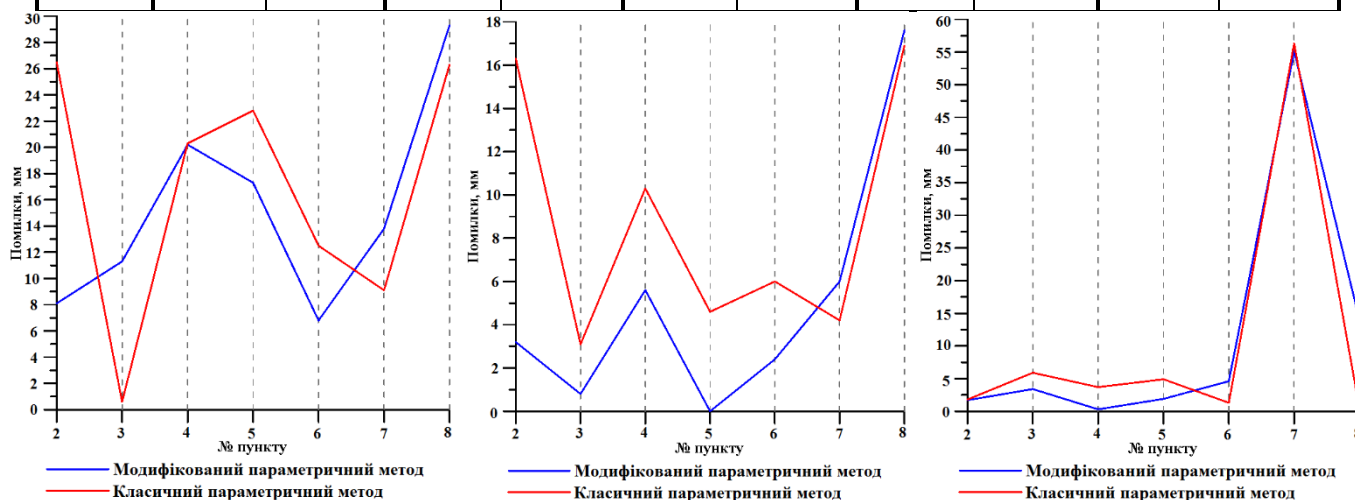
У таблицях 3.4 та 3.5 і рис. 3.3а-3.3д відображені результати опрацювання мережі (вектори обчислені в програмному пакеті ТВС) модифікованим параметричним і класичним параметричним методами. З рис. 3.3в видно, що по осі h результати є приблизно однакові, за винятком пункту 8. Якщо ж розглянути результати опрацювання мережі в плані та просторі (рис. 3.3г, 3.3д), то ефективність

модифікованого параметричного методу складає 15% у порівнянні з класичним параметричним методом.

Таблиця 3.4

**Помилки координат пунктів мережі визначені
модифікованим параметричним і класичним параметричним методами
(вектори обчислені в програмному пакеті ТВС)**

№ пункту	δ_x , мм		δ_y , мм		δ_h , мм		$\delta_{план}$, мм		$\delta_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	-8,1	-26,5	3,2	16,3	-1,7	-1,8	8,7	31,1	8,9	31,2
3	11,3	0,6	-0,8	-3,1	-3,4	-5,9	11,3	3,2	11,8	6,7
4	20,2	20,3	-5,6	-10,3	-0,3	-3,7	20,9	22,7	20,9	23,0
5	17,3	22,8	0,0	-4,6	-1,9	-4,9	17,3	23,2	17,4	23,8
6	6,8	12,5	-2,4	-6,0	4,6	-1,3	7,2	13,8	8,5	13,9
7	-13,8	-9,1	-6,0	-4,2	-55,1	-56,3	15,0	10,1	57,1	57,2
8	-29,3	-26,3	17,6	16,9	14,0	-0,4	34,2	31,2	36,9	31,2
$ \Sigma $	106,8	118,0	35,6	61,5	80,9	74,4	114,7	135,4	161,6	187,0
$ \text{серед} $	15,3	16,9	5,1	8,8	11,6	10,6	16,4	19,3	23,1	26,7



а)

б)

в)

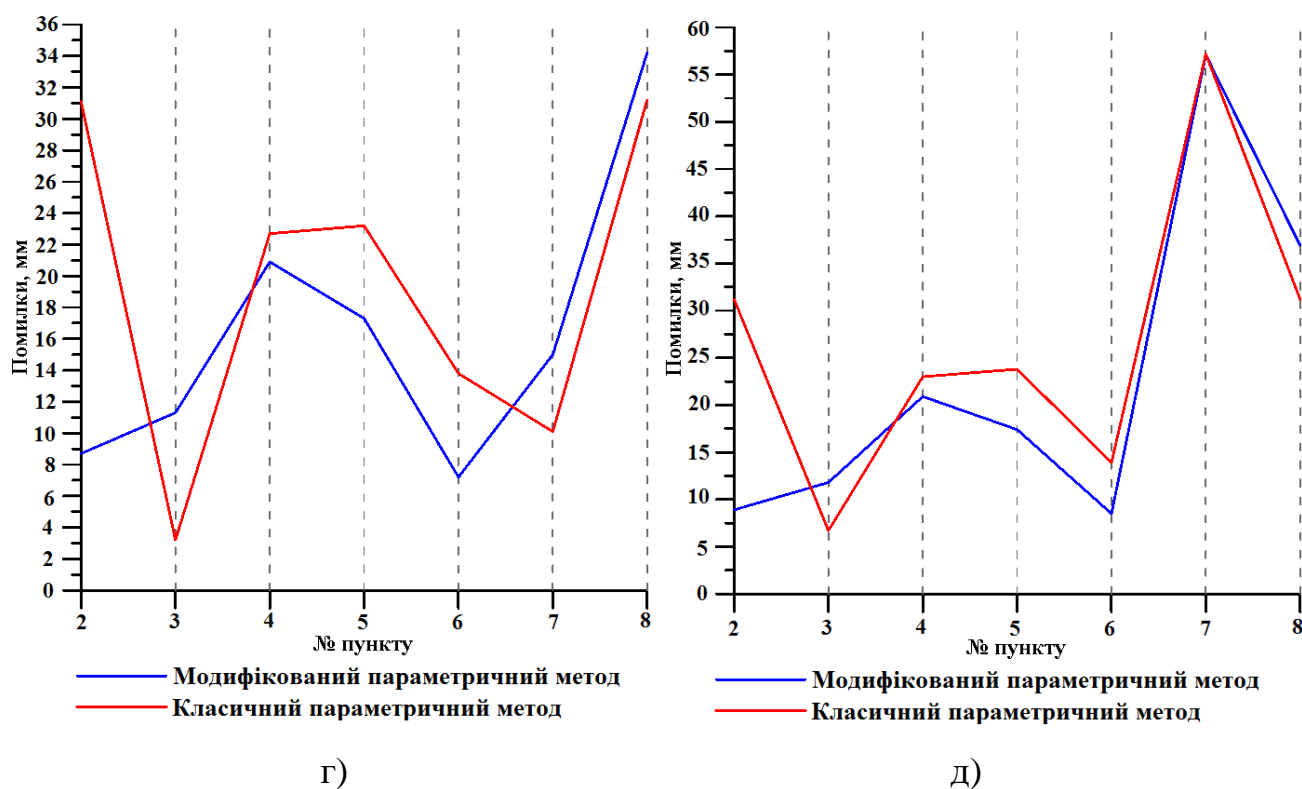


Рис. 3.3 Зміна помилок визначення координат пунктів модифікованим параметричним та класичним параметричним методами

(а. Помилки δ_x ; б. Помилки δ_y ; в. Помилки δ_h ;

г. Помилки в плані $\delta_{план}$; д. Просторові помилки $\delta_{прос}$)

У таблиці 3.5 представлені дослідження апостеріорної оцінки точності визначення координат двома методами мережі, для якої вектори обчислені в програмному пакеті ТВС. Результати показують, що точність визначення координат класичним методом є вищою ніж запропонованим модифікованим параметричним. Ці результати, як і для попередніх мереж, зумовлені тим, що кількість рівнянь поправок для класичного методу є більшою ніж для модифікованого параметричного. За результатами опрацювання двома методами мережі (вектори обчислені в програмному пакеті ТВС) встановлено, що середні квадратичні похибки визначені модифікованим параметричним методом, у середньому є меншими за помилки на 7%, а для класичного параметричного методу вони в середньому є меншими на 45%, що ще раз підтверджує присутність систематичних похибок у вимірах та ефективність врівноваження мереж модифікованим параметричним методом.

**Середні квадратичні похибки координат пунктів визначені
модифікованим параметричним і класичним параметричним методами
(вектори обчислені в програмному пакеті ТВС)**

№ пункту	m_x , мм		m_y , мм		m_h , мм		$m_{план}$, мм		$m_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	9,7	1,2	7,9	9,1	11,2	13,1	12,6	9,2	16,9	16,0
3	10,8	1,3	4,2	5,4	12,3	14,3	11,6	5,5	16,9	15,3
4	11,6	1,2	3,8	5,2	11,7	12,5	12,2	5,3	16,8	13,6
5	10,7	1,0	4,1	5,6	12,9	13,7	11,4	5,7	17,2	14,8
6	11,0	1,1	4,3	5,7	11,6	9,7	11,8	5,9	16,6	11,3
7	12,3	1,2	6,1	5,3	14,5	13,8	13,7	5,4	20,0	14,8
8	16,4	1,1	9,5	5,7	18,7	12,9	18,9	5,8	26,6	14,2
серед	11,8	1,1	5,7	6,0	13,3	12,9	13,2	6,1	18,7	14,3

В таблиці 3.6 та рисунку 3.4 приведено зведені результати визначення середніх помилок з опрацювання мереж модифікованим параметричним і класичним методами, а в таблиці 3.7 середні середньоквадратичні похибки за результатами врівноваження. У підсумку середні помилки визначення координат пунктів для мережі I та II є на 10-20% є меншими за результатами модифікованого параметричного методу врівноваження у порівнянні з класичним, що ще раз доводить ефективність запропонованого модифікованого параметричного методу врівноваження, навіть за умов обчислення векторів різними програмними продуктами.

**Середні помилки визначених координат
модифікованим параметричним та класичним параметричним методами**

Опрацювання в програмному пакеті	δ_x , мм		δ_y , мм		δ_h , мм		$\delta_{план}$, мм		$\delta_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
Середні										
LGO	14,5	16,3	6,4	9,9	34,6	34,9	16,2	19,3	42,4	44,1
TBC	15,3	16,9	5,1	8,8	11,6	10,6	16,4	19,3	23,1	26,7

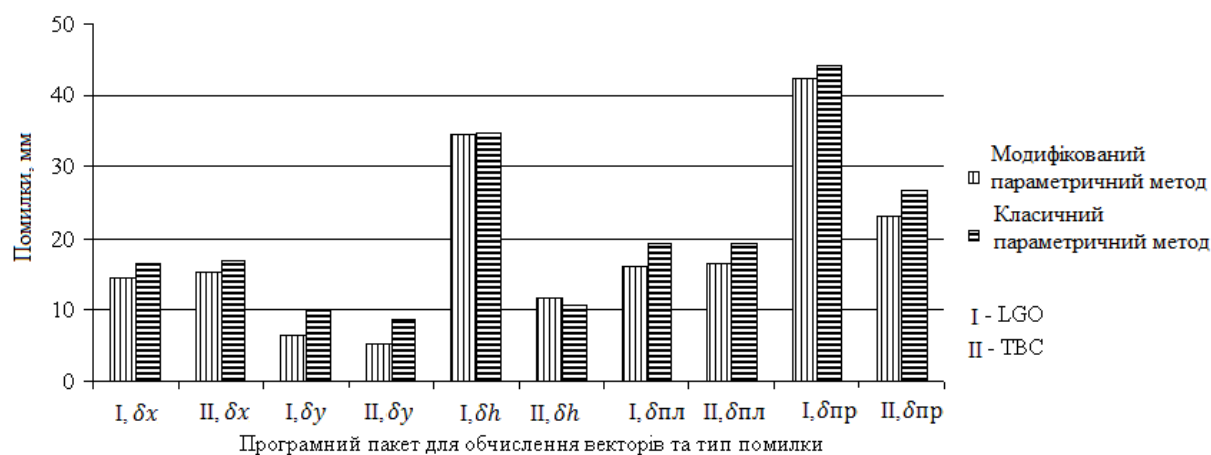


Рис. 3.4 Середні помилки координат визначених модифікованим параметричним та класичним параметричним методами за результатами опрацювання мереж

**Середні середньоквадратичні похибки визначених координат
модифікованим параметричним та класичним параметричним методами**

Опрацювання в програмному пакеті	m_x , мм		m_y , мм		m_h , мм		$m_{план}$, мм		$m_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
Середні										
LGO	11,7	1,1	5,9	5,7	25,1	20,8	13,3	5,8	28,4	21,7
TBC	11,8	1,1	5,7	6,0	13,3	12,9	13,2	6,1	18,7	14,3

На основі проведених досліджень встановлено, що результати опрацювання вимірів ГНСС-мереж в умовах, рекомендованих для виконання ГНСС-спостережень розробленим модифікованим параметричним методом, дозволяють частково вилучити з опрацювання систематичні похибки, які проявляються при опрацюванні ГНСС-мереж класичним методом. Ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження порівняно з класичним параметричним методом складає 10÷20%, але це для ідеальних умов видимості супутників. Необхідним є також дослідження запропонованого методу врівноваження для мереж з імітацією складних умов доступу до супутникових сигналів.

Помилки визначення координат пунктів модифікованим параметричним методом є практично співвимірні з середніми квадратичними похибками, отриманими з врівноваження мереж, натомість при опрацюванні мереж класичним методом помилки значно перевищують визначені параметри точності мереж.

3.2 РЕЗУЛЬТАТИ ВРІВНОВАЖЕННЯ ГНСС МЕРЕЖ З УМОВАМИ ОБМЕЖЕНОЇ ВИДИМОСТІ

У попередньому параграфі нами вже проведені дослідження ефективності модифікованого параметричного методу врівноваження мереж порівняно з класичним параметричним методом для мережі з імітацією ідеальних умов доступу до супутникових сигналів (кут відсічки супутників становив 10^0 і тривалість спостережень обмежена 12-ма годинами). Однак ГЕС в більшості випадків розташовані в умовах складного рельєфу, що приводить до обмеженого проходження сигналів до приймачів, і погіршує отримані результати. Тому необхідним є дослідження ефективності модифікованого параметричного методу для мереж з обмеженим доступом до супутникових сигналів [144].

З метою дослідження ефективності модифікованого параметричного методу проведемо врівноваження ГНСС-вимірів на трьох мережах перманентних станцій, зі спеціальною схемою вимірів. Вибрані перманентні станції, як і попередньому дослідженні, розташовані на південному заході США поблизу розлому Сан-Андреас. На кожному пункті мережі встановлені двочастотні ГНСС-приймачі. Мережа I

складається з 6-ти перманентних станцій, а саме: BKMS, ELSC, GVRS, AZU1, SPMS, BLSA. Мережа II складається з 8-ми перманентних станцій: p254, p229, p230, p228, MONB, p226, MHCB, p221. Мережа III складається з 10-ти станцій: p483, MVFD, p486, USGC, p480, MONP, p481, p066, POTR, DESC. Вхідними даними для обчислення векторів та врівноваження мереж були RINEX-файли результатів ГНСС-вимірів на цих станціях, які знаходяться у вільному доступі [39], а також значення точних ефемерид [16].

Для кожної мережі схема вимірів використовувалась ідентична до попередніх досліджень. Відповідно для першої мережі на кожний можливий вектор опирається чотири трикутники вимірних векторів (рис 5а). Виміри векторів кожного трикутника проводили в різні доби. Періоди вимірів усіх трьох мереж були відповідно 20, 56 та 120 днів. Утворені схеми вимірів мали корельовані вектори тільки у межах кожного окремого трикутника. Для цих мереж при застосуванні класичного методу врівноваження між рівняннями поправок залишаються кореляційні зв'язки. Натомість рівняння поправок модифікованого параметричного методу будуть позбавлені кореляції. Для встановлення переваг і недоліків та визначення точності координат пунктів, отриманих за результатами обох методів врівноваження, необхідно володіти достовірними «істинними» координатами пунктів. У нашому випадку візьмемо координати, отримані на підставі опрацювання довготривалих рядів спостережень з центру SOPAC, редуковані на середню епоху вимірів.

Отримані дані опрацьовуються незалежними методами і програмними пакетами. Для отримання найточніших координат станцій під час опрацювання даних максимально враховують поправки за можливі джерела похибок ГНСС-вимірів. Отримані результати зберігаються в архіві центру та знаходяться у вільному доступі.

На рисунках 3.5а, 3.5б та 3.5в наведено схематичне розташування пунктів вищезазначених мереж та у таблиці 3.8 приведені їх параметри, такі як мінімальна, середня та максимальна відстань між пунктами і кількість днів спостережень, що використовували для досліджень.

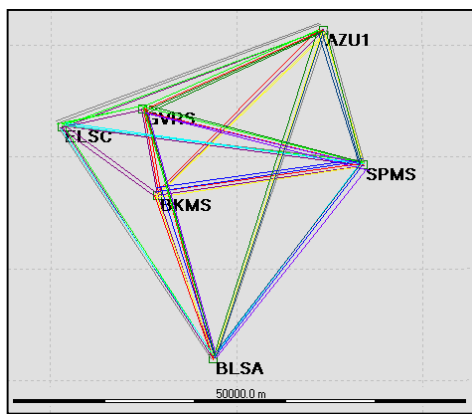


Рис. 3.5а Схема
мережі I

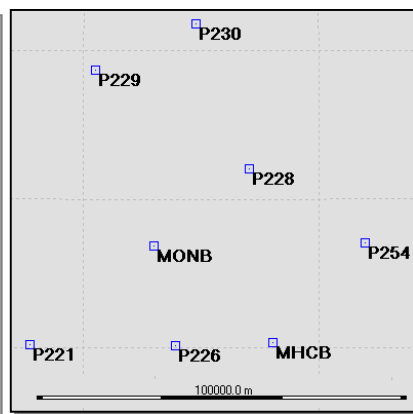


Рис. 3.5б Схема
мережі II

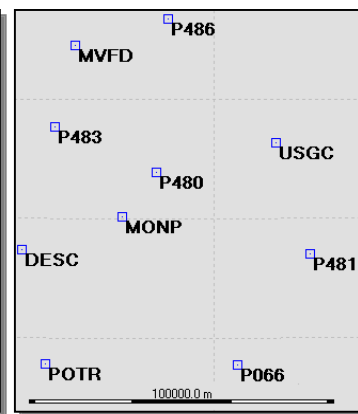


Рис. 3.5в Схема
мережі III

Таблиця 3.8

Параметри вихідних мереж

№ мережі	Мінімальна відстань між станціями, км	Середня відстань між станціями, км	Максимальна відстань між станціями, км	Кількість днів спостережень
I	9,039	23,354	38,219	20
II	16,276	36,171	60,211	56
III	11,687	42,224	75,484	120

В таблицях 3.9–3.11 представлено календарні графіки вимірів для мереж I, II та III.

Таблиця 3.9

Календарний графік вимірів для мережі I

№ дня спостережень	Дата спостережень	Станції	№ дня спостережень	Дата спостережень	Станції	№ дня спостережень	Дата спостережень	Станції	№ дня спостережень	Дата спостережень	Станції
1	1.05.2014	BKMS, ELSC, GVRS	2	2.05.2014	BKMS, ELSC, AZU1	3	3.05.2014	BKMS, ELSC, SPMS	4	4.05.2014	BKMS, ELSC, BLSA
5	5.05.2014	BKMS, GVRS, AZU1	6	6.05.2014	BKMS, GVRS, SPMS	7	7.05.2014	BKMS, GVRS, BLSA	8	8.05.2014	BKMS, AZU1, SPMS
9	9.05.2014	BKMS, AZU1, BLSA	10	10.05.2014	BKMS, SPMS, BLSA	11	11.05.2014	ELSC, GVRS, AZU1	12	12.05.2014	ELSC, GVRS, SPMS
13	13.05.2014	ELSC, GVRS, BLSA	14	14.05.2014	ELSC, AZU1, SPMS	15	15.05.2014	ELSC, AZU1, BLSA	16	16.05.2014	ELSC, SPMS, BLSA
17	17.05.2014	GVRS, AZU1, SPMS	18	18.05.2014	GVRS, AZU1, BLSA	19	19.05.2014	GVRS, SPMS, BLSA	20	20.05.2014	AZU1, SPMS, BLSA

Календарний графік вимірів для мережі II

№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції
1	1.06.2014	p254, p229, p230	2	2.06.2014	p254, p229, p228	3	3.06.2014	p254, p229, MONB	4	4.06.2014	p254, p229, p226
5	5.06.2014	p254, p229, МНСВ	6	6.06.2014	p254, p229, p221	7	7.06.2014	p254, p230, p228	8	8.06.2014	p254, p230, MONB
9	9.06.2014	p254, p230, p226	10	10.06.2014	p254, p230, МНСВ	11	11.06.2014	p254, p230, p221	12	12.06.2014	p254, p228, MONB
13	13.06.2014	p254, p228, p226	14	14.06.2014	p254, p228, МНСВ	15	15.06.2014	p254, p228, p221	16	16.06.2014	p254, MONB, p226
17	17.06.2014	p254, MONB, МНСВ	18	18.06.2014	p254, MONB, p221	19	19.06.2014	p254, p226, МНСВ	20	20.06.2014	p254, p226, p221
21	21.06.2014	p254, МНСВ, p221	22	22.06.2014	p229, p230, p228	23	23.06.2014	p229, p230, MONB	24	24.06.2014	p229, p230, p226
25	25.06.2014	p229, p230, МНСВ	26	26.06.2014	p229, p230, p221	27	27.06.2014	p229, p228, MONB	28	28.06.2014	p229, p228, p226
29	29.06.2014	p229, p228, МНСВ	30	30.06.2014	p229, p228, p221	31	1.07.2014	p229, MONB, p226	32	2.07.2014	p229, MONB, МНСВ
33	31.07.2014	p229, MONB, p221	34	4.07.2014	p229, p226, МНСВ	35	5.07.2014	p229, p226, p221	36	6.07.2014	p229, МНСВ, p221
37	7.07.2014	p230, p228, MONB	38	8.07.2014	p230, p228, p226	39	9.07.2014	p230, p228, МНСВ	40	10.07.2014	p230, p228, p221
41	11.07.2014	p230, MONB, p226	42	12.07.2014	p230, MONB, МНСВ	43	13.07.2014	p230, MONB, p221	44	14.07.2014	p230, p226, МНСВ
45	15.07.2014	p230, p226, p221	46	16.07.2014	p230, МНСВ, p221	47	17.07.2014	p228, MONB, p226	48	18.07.2014	p228, MONB, МНСВ
49	19.07.2014	p228, MONB, p221	50	20.07.2014	p228, p226, МНСВ	51	21.07.2014	p228, p226, p221	52	22.07.2014	p228, МНСВ, p221
53	23.07.2014	MONB, p226, МНСВ	54	24.07.2014	MONB, p226, p221	55	25.07.2014	MONB, МНСВ, p221	56	26.07.2014	p226, МНСВ, p221

Календарний графік вимірів для мережі III

№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.03.2013	p483, MVFD, p486	2	2.03.2013	p483, MVFD, USGC	3	3.03.2013	p483, MVFD, p480	4	4.03.2013	p483, MVFD, MONP
5	5.03.2013	p483, MVFD, p481	6	6.03.2013	p483, MVFD, p066	7	7.03.2013	p483, MVFD, POTR	8	8.03.2013	p483, MVFD, DESC
9	9.03.2013	p483, p486, USGC	10	10.03.2013	p483, p486, p480	11	11.03.2013	p483, p486, MONP	12	12.03.2013	p483, p486, p481
13	13.03.2013	p483, p486, p066	14	14.03.2013	p483, p486, POTR	15	15.03.2013	p483, p486, DESC	16	16.03.2013	p483, USGC, p480
17	17.03.2013	p483, USGC, MONP	18	18.03.2013	p483, USGC, p481	19	19.03.2013	p483, USGC, p066	20	20.03.2013	p483, USGC, POTR
21	21.03.2013	p483, USGC, DESC	22	22.03.2013	p483, p480, MONP	23	23.03.2013	p483, p480, p481	24	24.03.2013	p483, p480, p066
25	25.03.2013	p483, p480, POTR	26	26.03.2013	p483, p480, DESC	27	27.03.2013	p483, MONP, p481	28	28.03.2013	p483, MONP, p066
29	29.03.2013	p483, MONP, POTR	30	30.03.2013	p483, MONP, DESC	31	31.03.2013	p483, p481, p066	32	1.04.2013	p483, p481, POTR
33	2.04.2013	p483, p481, DESC	34	3.04.2013	p483, p066, POTR	35	4.04.2013	p483, p066, DESC	36	5.04.2013	p483, POTR, DESC
37	6.04.2013	MVFD, p486, USGC	38	7.04.2013	MVFD, p486, p480	39	8.04.2013	MVFD, p486, MONP	40	9.04.2013	MVFD, p486, p481
41	10.04.2013	MVFD, p486, p066	42	11.04.2013	MVFD, p486, POTR	43	12.04.2013	MVFD, p486, DESC	44	13.04.2013	MVFD, USGC, p480
45	14.04.2013	MVFD, USGC, MONP	46	15.04.2013	MVFD, USGC, p481	47	16.04.2013	MVFD, USGC, p066	48	17.04.2013	MVFD, USGC, POTR
49	18.04.2013	MVFD, USGC, DESC	50	19.04.2013	MVFD, p480, MONP	51	20.04.2013	MVFD, p480, p481	52	21.04.2013	MVFD, p480, p066
53	22.04.2013	MVFD, p480, POTR	54	23.04.2013	MVFD, p480, DESC	55	24.04.2013	MVFD, MONP, p481	56	25.04.2013	MVFD, MONP, p066
57	26.04.2013	MVFD, MONP, POTR	58	27.04.2013	MVFD, MONP, DESC	59	28.04.2013	MVFD, p481, p066	60	29.04.2013	MVFD, p481, POTR
61	30.04.2013	MVFD, p481, DESC	62	1.05.2013	MVFD, p066, POTR	63	2.05.2013	MVFD, p066, DESC	64	3.05.2013	MVFD, POTR, DESC

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
65	4.05.2013	p486, USGC, p480	66	5.05.2013	p486, USGC, MONP	67	6.05.2013	p486, USGC, p481	68	7.05.2013	p486, USGC, p066
69	8.05.2013	p486, USGC, POTR	70	9.05.2013	p486, USGC, DESC	71	10.05.2013	p486, p480, MONP	72	11.05.2013	p486, p480, p481
73	12.05.2013	p486, p480, p066	74	13.05.2013	p486, p480, POTR	75	14.05.2013	p486, p480, DESC	76	15.05.2013	p486, MONP, p481
77	16.05.2013	p486, MONP, p066	78	17.05.2013	p486, MONP, POTR	79	18.05.2013	p486, MONP, DESC	80	19.05.2013	p486, p481, p066
81	20.05.2013	p486, p481, POTR	82	21.05.2013	p486, p481, DESC	83	22.05.2013	p486, p066, POTR	84	23.05.2013	p486, p066, DESC
85	24.05.2013	p486, POTR, DESC	86	25.05.2013	USGC, p480, MONP	87	26.05.2013	USGC, p480, p481	88	27.05.2013	USGC, p480, p066
89	28.05.2013	USGC, p480, POTR	90	29.05.2013	USGC, p480, DESC	91	30.05.2013	USGC, MONP, p481	92	31.05.2013	USGC, MONP, p066
93	1.06.2013	USGC, MONP, POTR	94	2.06.2013	USGC, MONP, DESC	95	3.06.2013	USGC, p481, p066	96	4.06.2013	USGC, p481, POTR
97	5.06.2013	USGC, p481, DESC	98	6.06.2013	USGC, p066, POTR	99	7.06.2013	USGC, p066, DESC	100	8.06.2013	USGC, POTR, DESC
101	9.06.2013	p480, MONP, p481	102	10.06.2013	p480, MONP, p066	103	11.06.2013	p480, MONP, POTR	104	12.06.2013	p480, MONP, DESC
105	13.06.2013	p480, p481, p066	106	14.06.2013	p480, p481, POTR	107	15.06.2013	p480, p481, DESC	108	16.06.2013	p480, p066, POTR
109	17.06.2013	p480, p066, DESC	110	18.06.2013	p480, POTR, DESC	111	19.06.2013	MONP, p481, p066	112	20.06.2013	MONP, p481, POTR
113	21.06.2013	MONP, p481, DESC	114	22.06.2013	MONP, p066, POTR	115	23.06.2013	MONP, p066, DESC	116	24.06.2013	MONP, POTR, DESC
117	25.06.2013	p481, p066, POTR	118	26.06.2013	p481, p066, DESC	119	27.06.2013	p481, POTR, DESC	120	28.06.2013	p066, POTR, DESC

Обчислення векторів проводили в програмному пакеті LGO з урахуванням точних ефемерид та файлів зміщення фазових центрів антен. Для імітації складних умов доступу до супутникових сигналів та підсилення впливу систематичних похибок було прийнято кут відсічки супутників 20^0 , тривалість спостережень була обмежена 4-ма годинами. Для обчислення векторів обчислювали поправки за

тропосферну затримку згідно з моделлю Хопфілда та іоносферну затримку визначали з двох частот L_1 та L_2 .

Після обчислення векторів склали рівняння поправок для вимірних векторів для класичного методу врівноваження (2.1) та модифікованого параметричного методу (2.1, 2.14). Загальна кількість рівнянь поправок для обох методів врівноваження приведена в табл. 3.12.

Таблиця 3.12

Кількість рівнянь поправок

Мережа	Кількість рівнянь	
	Модифікований параметричний метод	Класичний параметричний метод
I	40	60
II	112	168
III	240	360

За утвореними матрицями рівнянь поправок виконувалося врівноваження мереж способом найменших квадратів з оцінкою точності визначених координат. За координати першого пункту мережі приймалися координати, визначені центром SOPAC, координати решти пунктів визначали за результатами врівноваження. На основі визначених координат з врівноважених мереж визначено їх різниці з координатами відповідних пунктів визначених центром SOPAC. Ці різниці є визначеними для класичного параметричного та модифікованого параметричного методів і трансформованими на площину Універсальної проєкції Меркатора. Різниці, визначені відносно координат центру SOPAC, можна інтерпретувати, як помилки визначення координат пунктів за результатами врівноваження. Тому далі ці різниці називаємо помилками визначених координат відповідним методом врівноваження. Результати визначення помилок координат пунктів δ_x , δ_y , δ_h для мережі I двома методами врівноваження представлено в таблиці 3.13. В передостанньому рядку таблиці приведена сума, а в останньому рядку середнє значення відповідних помилок. У колонках 8 і 9 приведено помилки кожного з пунктів у плані, а в колонках 10 і 11 у

просторі. З цієї таблиці видно, що сумарні помилки по осях x і h приблизно на 46% та 39% є меншими ніж помилки, отримані класичним методом, а по осі y вони практично збігаються. Помилки отримані модифікованим параметричним методом у плані та просторі, на 43% і 35% менші ніж отримані класичним параметричним методом, що підтверджує доцільність використання запропонованого модифікованого параметричного методу врівноваження.

Таблиця 3.13

**Помилки визначених координат пунктів мережі І
модифікованим параметричним і класичним параметричним методами**

№ пункту	δ_x , мм		δ_y , мм		δ_h , мм		$\delta_{план}$, мм		$\delta_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	-1,5	0,6	1,1	2,7	2,6	-10,1	1,9	2,8	3,2	10,5
3	6,5	11,6	-2,3	-1,6	0,2	-16,2	6,9	11,7	6,9	19,9
4	6,2	12,9	-1,9	-0,7	-1,0	-22,1	6,5	12,9	6,6	25,6
5	9,0	15,2	-6,2	-5,8	-50,5	-67,5	11,0	16,3	51,7	69,5
6	5,6	13,5	-3,3	-3,5	-41,7	-41,6	6,5	13,9	42,2	43,9
$ \Sigma $	28,8	53,8	14,9	14,2	96,0	157,5	32,7	57,6	110,5	169,4
серед	5,8	10,8	3,0	2,8	19,2	31,5	6,5	11,5	22,1	33,9

Отримані результати зміни помилок визначених координат пунктів за результатами врівноваження двома методами зображені на рисунках 3.6а-3.6д. З графіків 3.6г та 3.6д видно, що відхилення, отримані модифікованим параметричним методом, значно менші ніж класичним параметричним.

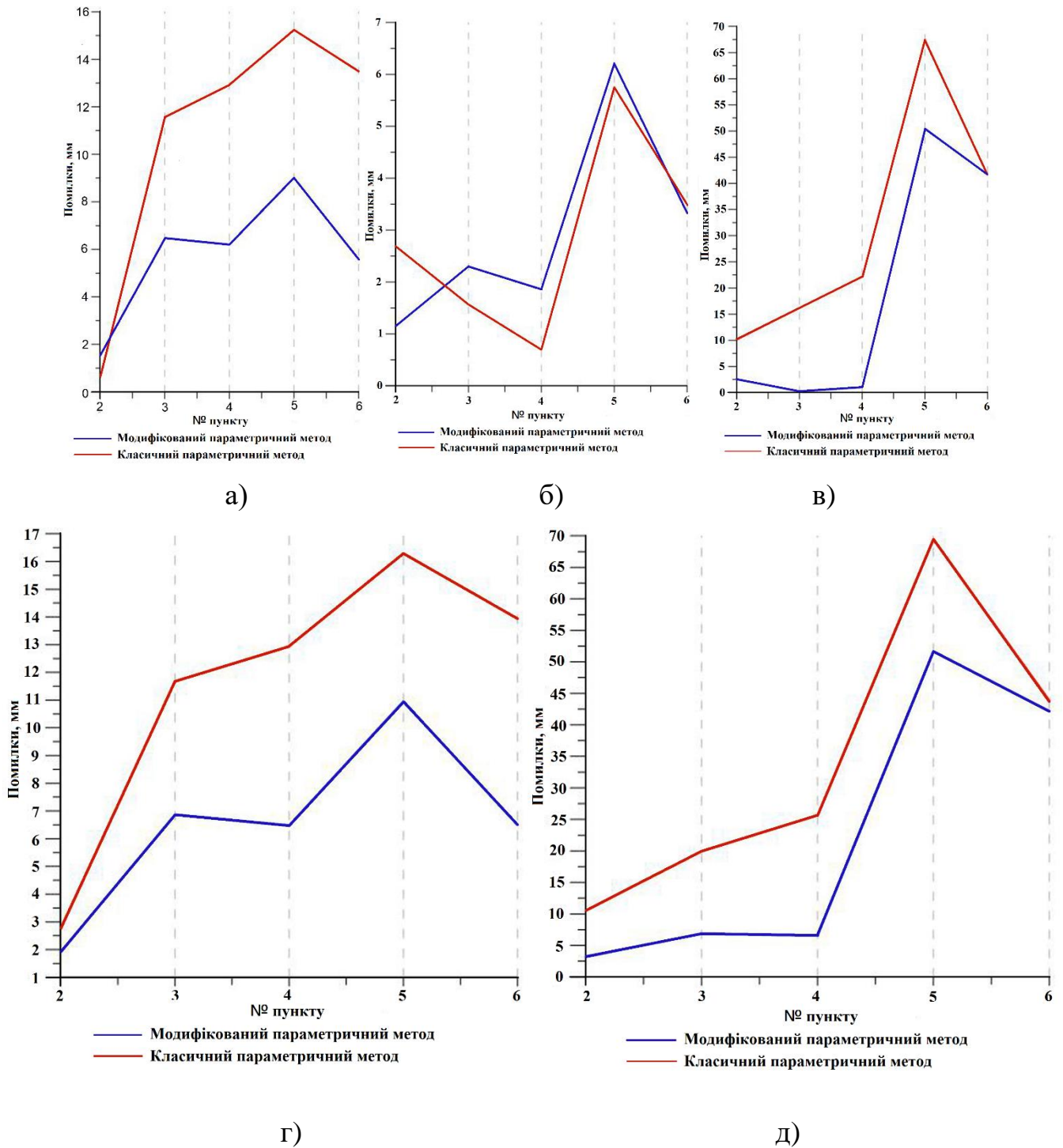


Рис. 3.6 Зміна помилок визначення координат пунктів модифікованим параметричним та класичним параметричним методами

(а. Помилки δ_x ; б. Помилки δ_y ; в. Помилки δ_h ; г. Помилки в плані $\delta_{план}$;

д. Просторові помилки $\delta_{прост}$)

У таблиці 3.14 представлена апостеріорна оцінка точності визначених координат пунктів за результатами врівноваження модифікованим параметричним та класичним параметричним методами. В останньому рядку приведені середні квадратичні

похибки визначення координат пунктів. З таблиці 3.14 видно, за результатами врівноваження, що середні квадратичні похибки визначення координат x та y класичним параметричним методом, є меншими ніж модифікованим параметричним, що обумовлено більшою кількістю рівнянь вимірів. По осі h середньоквадратичні похибки модифікованим параметричним методом є в деякій мірі кращими, ніж класичним методом, що, можливо, пов'язано з недостатньою кількістю пунктів мережі. Необхідно зауважити, що отримані з врівноважень похибки для обох методів є значно меншими ніж реальні похибки, визначені при порівнянні з координатами, визначеними центром SOPAC, що вказує на присутність внутрішньої збіжності при оцінці точності врівноважених мереж і наявності систематичних похибок, які не усуваються врівноваження.

Представлені результати дозволяють припустити, що модифікований параметричний метод порівняно з класичним у значній мірі дозволяє усунути систематичні похибки вимірів, які виникають у векторах при одночасних вимірах, та остаточні результати врівноваження є більш надійними чим результати, отримані класичним методом.

Таблиця 3.14

**Середні квадратичні похибки визначених координат пунктів мережі I
модифікованим параметричним і класичним параметричним методами**

№ пункту	m_x , мм		m_y , мм		m_h , мм		$m_{план}$, мм		$m_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	4,9	3,7	2,7	2,0	15,7	19,6	5,6	4,2	16,6	20,0
3	5,0	3,8	3,0	2,4	15,5	20,7	5,9	4,5	16,6	21,1
4	5,5	3,8	3,4	2,1	14,9	20,5	6,5	4,4	16,2	21,0
5	6,5	4,0	3,7	2,3	17,3	20,7	7,4	4,6	18,8	21,2
6	13,0	3,7	4,4	2,4	28,2	21,3	13,7	4,5	31,3	21,7
серед	7,0	3,8	3,4	2,3	18,3	20,6	7,8	4,4	19,9	21,0

Результати опрацювання мережі II представлені у таблицях 3.15, 3.16 і рисунках 3.7а, 3.7б, 3.7в, 3.7г, 3.7д. З рисунків 3.7а, 3.7б, 3.7в та таблиці 3.15 видно, що для

мережі II помилки визначених координат модифікованим параметричним методом є значно менші ніж помилки у координатах, визначених класичним методом, окрім пункту 7 для осі y та пунктів 3 і 7 для осі h . Сумарні помилки мережі II є в 4 рази меншими по осям x та y і в 1,5 рази по осі h . Порівнявши помилки визначених координат пунктів двома методами в плані і просторі (рис. 3.7г, 3.7д), можна стверджувати, що модифікований параметричний метод врівноваження дає на 73% кращий результат у плані і на 53% у просторі ніж класичний параметричний, окрім пункту 7.

Порівнюючи середні похибки визначення координат пунктів та середні середньоквадратичні похибки визначених координат пунктів мережі II модифікованим параметричним та класичним параметричним методами, слід зазначити, що для модифікованого параметричного методу вони практично співпадають, а для класичного параметричного методу похибки в середньому на 40% є меншими ніж самі помилки.

Таблиця 3.15

**Помилки визначених координат пунктів мережі II
модифікованим параметричним і класичним параметричним методами**

№ пункту	δ_x , мм		δ_y , мм		δ_h , мм		$\delta_{план}$, мм		$\delta_{прост}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	5,5	66,1	2,3	-30,2	-16,7	-66,1	5,9	72,7	17,7	98,3
3	-10,7	47,5	3,4	-22,5	20,8	-8,1	11,2	52,6	23,6	53,2
4	8,6	70,0	-3,4	-33,5	-8,9	-44,1	9,3	77,6	12,8	89,2
5	-5,0	57,2	-3,0	-33,6	-5,8	-31,5	5,9	66,3	8,2	73,4
6	-13,7	42,3	7,8	-25,3	-71,7	-96,4	15,8	49,3	73,4	108,3
7	-5,5	18,2	23,0	-6,4	76,1	23,6	23,6	19,3	79,7	30,5
8	35,5	59,0	-12,1	-39,5	2,3	-52,7	37,5	71,1	37,6	88,4
$ \Sigma $	84,6	360,4	54,9	191,0	202,2	322,5	109,2	408,9	253,1	541,4
серед	12,1	51,5	7,8	27,3	28,9	46,1	15,6	58,4	36,2	77,3

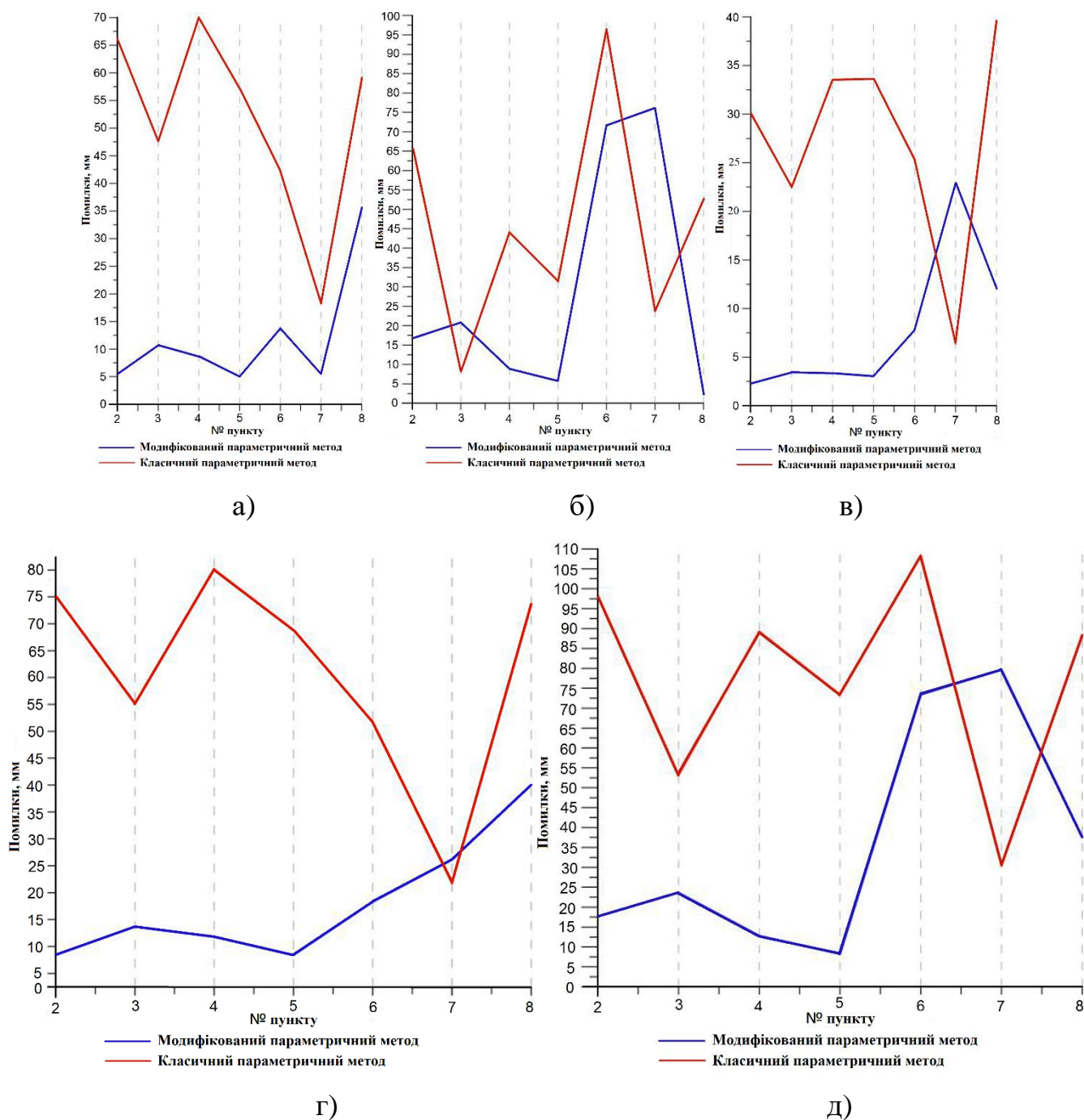


Рис. 3.7 Зміна помилок визначення координат пунктів модифікованим параметричним та класичним параметричним методами

(а. Помилки δ_x ; б. Помилки δ_y ; в. Помилки δ_h ; г. Помилки в плані $\delta_{план}$;

д. Просторові помилки $\delta_{прост}$)

У таблиці 3.16 наведена апостеріорна оцінка точності визначених координат пунктів двома методами. Проаналізувавши таблицю 3.16, можна стверджувати, що точність визначення координат класичним параметричним методом є вищою ніж

модифікованим параметричним, що обумовлено, як і для першої мережі, меншою кількістю рівнянь.

Порівнявши середні помилки визначення координат пунктів та середні середньоквадратичні похибки визначення координат пунктів мережі II модифікованим параметричним та класичним параметричним методами, слід зазначити, що для модифікованого параметричного методу похибки є меншими за помилки на 20%, а для класичного параметричного методу похибки в середньому менші на 70% ніж помилки.

Таблиця 3.16

Середні квадратичні похибки визначених координат пунктів мережі II модифікованим параметричним і класичним параметричним методами

№ пункту	m_x , мм		m_y , мм		m_h , мм		$m_{план}$, мм		$m_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	7,9	7,8	5,7	5,5	20,9	20,3	9,7	9,5	23,0	22,5
3	9,8	10,1	4,7	4,5	17,2	15,2	10,9	11,0	20,4	18,8
4	10,1	10,3	4,2	4,6	19,8	18,9	11,0	11,3	22,6	22,0
5	9,8	9,6	4,4	4,6	20,7	17,8	10,7	10,6	23,3	20,8
6	13,6	8,2	4,9	4,5	24,6	19,9	14,5	9,4	28,6	22,0
7	4,9	1,1	6,4	4,5	25,2	16,1	8,1	4,7	26,4	16,8
8	4,9	2,2	10,8	4,8	33,0	21,3	11,9	5,3	35,1	22,0
серед	8,7	7,0	5,9	4,7	23,0	18,5	11,0	8,8	25,6	20,7

Аналогічна ситуація спостерігається за результатами врівноваження та похибками вимірів для мережі III (табл. 3.17). Помилки визначення координат модифікованим параметричним методом в більшості випадках є меншими ніж класичним параметричним, що знову вказує на наявність систематичних похибок мережі і часткове їх усунення модифікованим параметричним методом. З рисунків 3.8а, 3.8б, 3.8в видно, що помилки визначення координат класичним методом є менші

по осі x для пунктів 3, 4, 8, 10, але для решти пунктів ефективність модифікованого параметричного методу складає 30%. По осі y помилки визначення координат пунктів класичним методом є меншими для пунктів 6, 7, 9, 10, але для решти пунктів ефективність модифікованого параметричного методу становить 25% та по осі h для пунктів 7 і 9 кращим є класичний метод, а для решти пунктів ефективність модифікованого параметричного методу становить 50%. Помилки визначення координат у плані і просторі зображені на рисунках 3.8г і 3.8д. Слід зазначити, що помилки, отримані модифікованим параметричним методом, є менші ніж помилки визначені з врівноваження класичним параметричним методом, та ефективність його становить 12% у плані і 26% у просторі.

Таблиця 3.17

**Помилки визначених координат пунктів мережі III
модифікованим параметричним і класичним параметричним методами**

№ пункту	δ_x , мм		δ_y , мм		δ_h , мм		$\delta_{план}$, мм		$\delta_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	-2,0	-6,7	2,0	-2,7	-12,6	-21,0	2,8	7,3	12,9	22,2
3	3,8	2,5	-1,4	-8,2	-17,4	-18,0	4,0	8,5	17,9	19,9
4	3,2	2,9	-4,0	-13,3	45,2	86,1	5,1	13,6	45,5	87,1
5	2,9	4,2	-2,4	-11,9	37,5	68,3	3,8	12,6	37,7	69,5
6	-5,7	-6,5	7,7	-0,4	22,1	44,7	9,6	6,6	24,1	45,2
7	-8,7	-11,9	9,7	3,2	-38,6	-17,5	13,0	12,3	40,7	21,4
8	7,3	2,7	-0,8	-6,5	-0,7	18,3	7,3	7,1	7,3	19,7
9	-8,2	-11,8	12,9	9,2	-19,4	-8,8	15,3	15,0	24,7	17,3
10	2,6	-0,9	16,2	4,9	-2,2	-3,6	16,4	5,0	16,6	6,2
$ \Sigma $	44,4	50,2	57,0	60,4	195,8	286,4	77,3	88,0	227,4	308,6
$ \text{серед} $	4,9	5,6	6,3	6,7	21,8	31,8	8,6	9,8	25,3	34,3

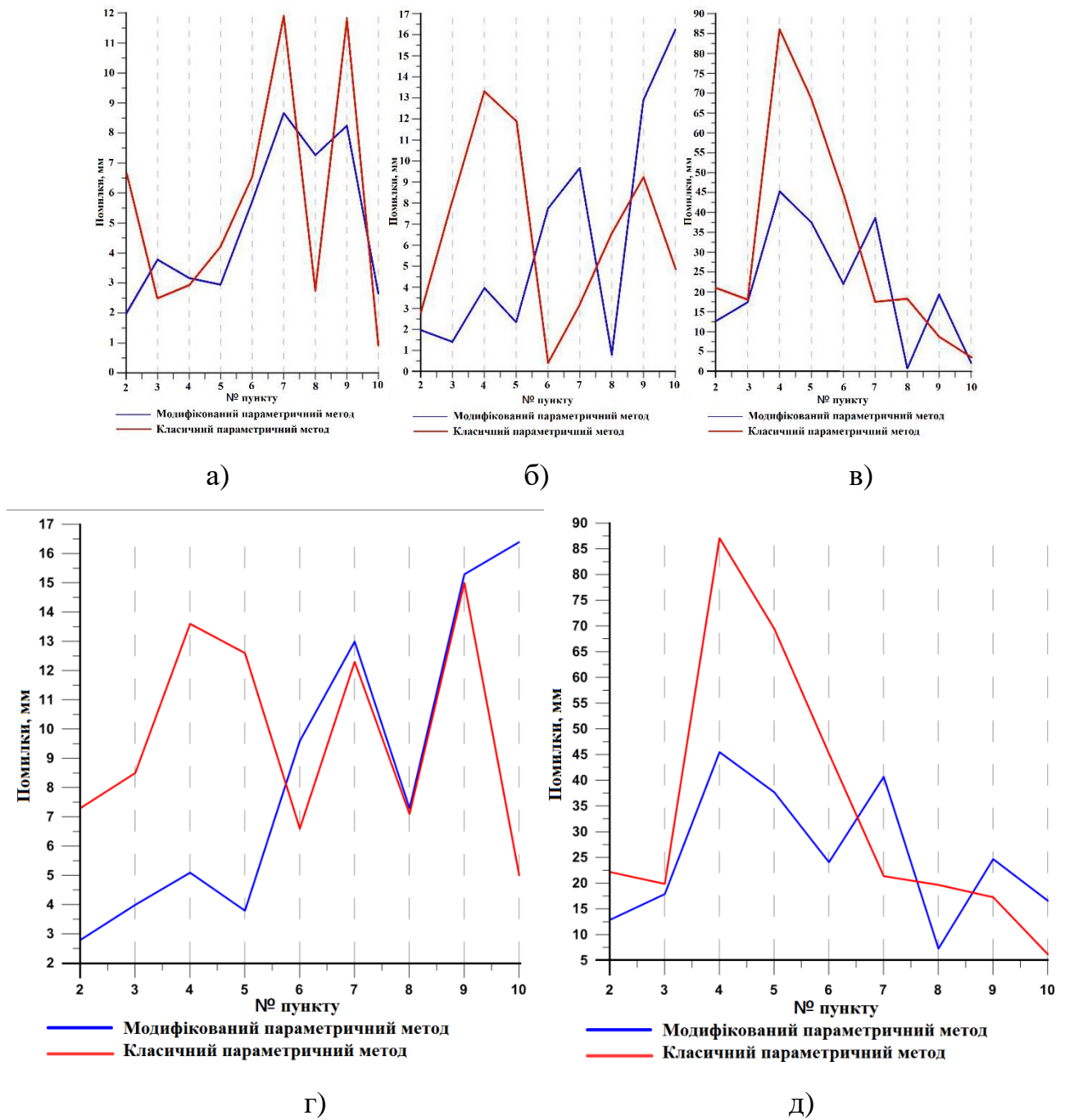


Рис. 3.8 Зміна помилок визначення координат пунктів модифікованим параметричним та класичним параметричним методами

(а. Помилки δ_x ; б. Помилки δ_y ; в. Помилки δ_h ; г. Помилки в плані $\delta_{план}$; д. Просторові помилки $\delta_{прост}$)

Результати досліджень апостеріорної оцінки точності визначення координат двома методами (для мережі III, табл. 3.18) показують, що точність визначення координат класичним методом є вищою ніж запропонованим модифікованим параметричним. Ці результати, як і для попередніх мереж, зумовлені тим, що

кількість рівнянь поправок для класичного методу є більшою ніж для модифікованого параметричного.

За результатами опрацювання двома методами мережі III встановлено, що середньоквадратичні похибки, визначені модифікованим параметричним методом, у середньому є меншими за помилки на 20%, а для класичного параметричного методу вони в середньому є меншими на 55%. Це ще раз підтверджує присутність систематичних похибок у вимірах та ефективність врівноваження мереж модифікованим параметричним методом.

Таблиця 3.18

Середні квадратичні похибки визначених координат пунктів мережі III модифікованим параметричним і класичним параметричним методами

№ пункту	m_x , мм		m_y , мм		m_h , мм		$m_{план}$, мм		$m_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	3,0	2,3	2,5	2,3	23,2	18,2	3,9	3,3	23,5	18,5
3	3,6	2,8	2,9	2,6	19,3	14,8	4,6	3,9	19,8	15,3
4	3,8	2,9	3,1	2,8	23,9	18,0	4,9	4,1	24,4	18,4
5	3,6	2,4	3,2	2,9	24,0	17,8	4,8	3,8	24,4	18,2
6	3,7	2,3	3,4	2,8	20,8	15,4	5,0	3,6	21,3	15,8
7	3,6	2,0	3,6	2,8	25,3	19,3	5,1	3,5	25,8	19,6
8	3,2	1,1	4,2	3,2	24,4	15,2	5,2	3,4	24,9	15,6
9	3,7	1,8	4,8	3,1	26,6	14,4	6,1	3,5	27,3	14,9
10	4,1	1,8	6,6	2,3	38,7	14,6	7,8	2,9	39,4	14,9
серед	3,6	2,1	3,8	2,8	25,1	16,4	5,3	3,5	25,7	16,6

Узагальнюючи результати опрацювання усіх трьох мереж, необхідно зазначити, що середньоквадратичні похибки, визначені класичним методом, у середньому на 60% є меншими ніж визначені помилки цим же методом, а для модифікованого параметричного методу вони є меншими в середньому на 20%, що і підтверджує

переваги модифікованого параметричного методу з усунення систематичних похибок вимірів.

У таблиці 3.19 та рисунках 3.9-3.10 приведені зведені результати визначення середніх та максимальних помилок з опрацювання мереж модифікованим параметричним і класичним методами, а в таблиці 3.20 максимальні і середні середньоквадратичні похибки за результатами врівноваження. Середні та максимальні помилки визначення координат пунктів у цілому є на 10-50% меншими за результатами модифікованого параметричного методу врівноваження у порівнянні з класичним. Необхідно зауважити, що модифікований параметричний метод не має суттєвих розбіжностей між визначеними похибками координат пунктів та середньоквадратичними похибками, визначеними за результатами врівноваження. Тільки для мережі II при порівнянні їх максимальних значень видно, що помилки координат переважають очікувану точність. Натомість, проводячи аналогічні порівняння для класичного методу врівноваження, прослідковується значне перевищення помилок визначення координат над очікуваною точністю з врівноваження мережі. Ця тенденція прослідковується як для середніх, так і для максимальних значень параметрів точності. На основі цього можна стверджувати, що в ГНСС-мережах виміри, в яких проводяться статичним методом в екстремальних умовах (частково обмежена видимість, відносно короткі інтервали спостережень) виникають систематичні похибки при опрацюванні одночасно виміряних векторів.

Таблиця 3.19

**Середні і максимальні помилки визначених координат
модифікованим параметричним та класичним параметричним методами**

Мережа	δ_x , мм		δ_y , мм		δ_h , мм		$\delta_{план}$, мм		$\delta_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Середні										
I	5,8	10,8	3,0	2,8	19,2	31,5	6,5	11,5	22,1	33,9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
II	12,1	51,5	7,8	27,3	28,9	46,1	15,6	58,4	36,2	77,3
III	4,9	5,6	6,3	6,7	21,8	31,8	8,6	9,8	25,3	34,3
Максимальні										
I	9,0	15,2	6,2	5,8	50,5	67,5	11,0	16,3	51,7	69,5
II	35,5	70,0	23,0	39,5	76,1	96,4	37,5	77,6	79,7	108,3
III	8,7	11,9	16,2	13,3	45,2	86,1	16,4	15,0	45,5	87,1

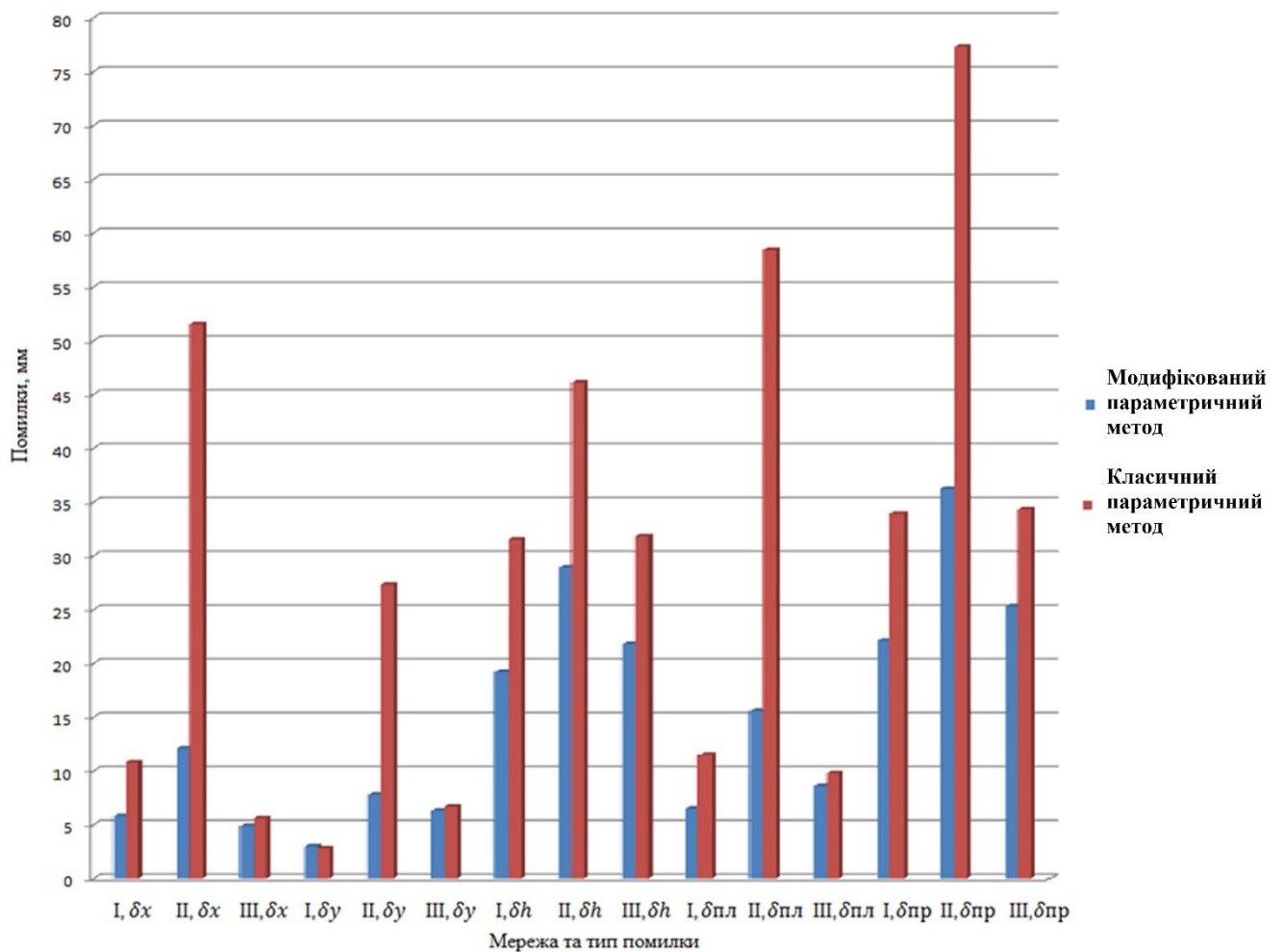


Рис. 3.9. Середні помилки координат, визначених модифікованим параметричним та класичним параметричним методами за результатами опрацювання трьох мереж.

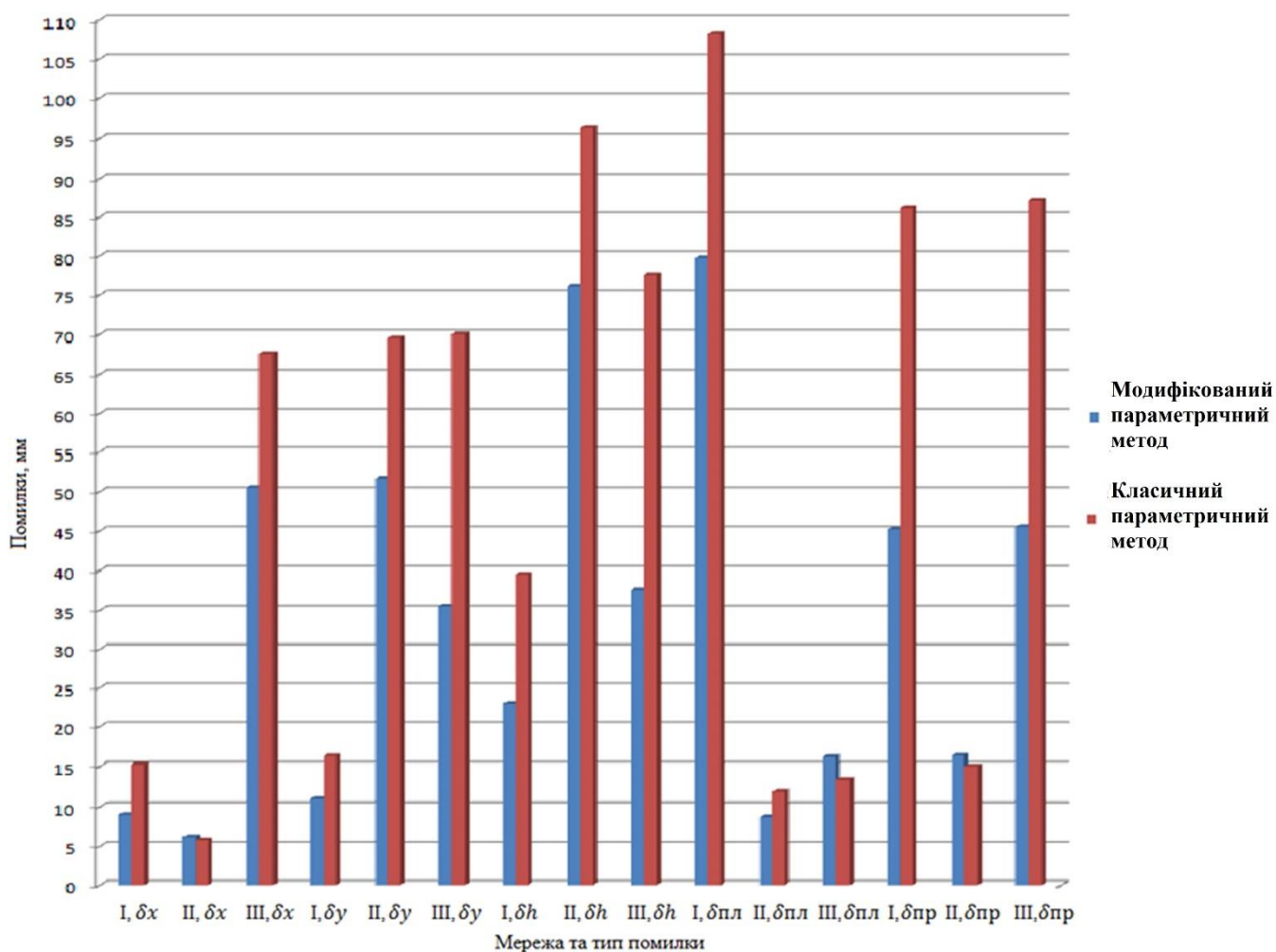


Рис. 3.10. Максимальні помилки, визначених координат модифікованим параметричним та класичним параметричним методами за результатами опрацювання трьох мереж.

Таблиця 3.20

Середні і максимальні середньоквадратичні похибки визначених координат модифікованим параметричним та класичним параметричним методами

Мережа	m_x , мм		m_y , мм		m_h , мм		$m_{план}$, мм		$m_{прос}$, мм	
	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Середні										
I	7,0	3,8	3,4	2,3	18,3	20,6	7,8	4,4	19,9	21,0
II	8,7	7,0	5,9	4,7	23,0	18,5	11,0	8,8	25,6	20,7
III	3,6	2,1	3,8	2,8	25,1	16,4	5,3	3,5	25,7	16,8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Максимальні										
I	13,0	4,0	4,4	2,4	28,2	21,3	13,7	4,6	31,3	21,7
II	13,6	10,3	10,8	5,5	33,0	21,3	14,5	11,3	35,1	22,5
III	4,1	2,9	6,6	3,2	38,7	19,3	7,8	4,1	39,4	19,6

На основі виконаних досліджень встановлено, що результати опрацювання вимірів ГНСС-мереж з обмеженим доступом до супутникових сигналів, розробленим модифікованим параметричним методом, дозволяють суттєво вилучити з опрацювання систематичні похибки, які проявляються при опрацюванні ГНСС-мереж класичним методом. Помилки визначення координат пунктів модифікованим параметричним методом є практично співвимірні з середніми квадратичними похибками, отриманими із врівноваження мереж, натомість при опрацюванні мереж класичним методом помилки значно перевищують визначені параметри точності мереж.

Для підтвердження ефективності опрацювання інженерно-геодезичних мереж модифікованим параметричним методом врівноваження необхідно виконати експериментальні дослідження на реально існуючих об'єктах. Одним з таких об'єктів є Тербле-Ріцька ГЕС, яка розташована в Українських Карпатах, що обумовлює відповідно складні фізико-географічні та кліматичні умови ведення спостережень. На території даної ГЕС розташована інженерно-геодезична мережа, яка задовольняє умови перевірки ефективності запропонованого методу.

3.3 ЛІНІЙНО-КУТОВІ МЕРЕЖІ ТЕРЕБЛЕ-РІЦЬКОЇ ГЕС

Тербле-Ріцька ГЕС – це унікальна гідроелектростанція дериваційного типу, розташована в Хустському районі Закарпатської області, введена в експлуатацію у 1956 році. Територія ГЕС знаходиться у гірській місцевості між двома майже паралельними річками Тербля та Ріка. Унікальність цієї ГЕС у тому, що річки є розташованими на різних висотних рівнях, перепад висот між ними становить 200 м. Таке місце розташування дозволяє використовувати природній перепад води для виробітку електроенергії, адже води з басейну річки Тербля скидаються у басейн річки Ріка.

На річці Терєбля споруджено греблю довжиною 153 м і висотою 45,8 м. В результаті чого утворилося Вільшанське водосховище, яке має площу водного дзеркала 1,55 км² і об'єм 23,6 млн.м³. Між рікою Терєбля і рікою Ріка споруджено дериваційний тунель довжиною 3,7 км, по якому води Терєблі через Терєбле-Ріцьку ГЕС потрапляють у ріку Ріка [63].

Враховуючи особливості місця розташування даної ГЕС та тривалий час її експлуатації (понад 60 років), необхідно виконувати контроль за станом напірного трубопроводу та інженерних споруд. У процесі вивчення сучасних методів спостережень за деформаціями інженерних споруд даного типу та теоретичних досліджень нами було запропоновано і випробувано метод ведення одночасних спостережень двома високоточними тахеометрами. Запропонований метод полягає на розбитті мережі пунктів на трикутники. На двох вершинах трикутника розташовують тахеометри, а на третій відбивач та виконують одночасні паралельні лінійно-кутові вимірювання. Таким чином виконують спостереження на всіх можливих трикутниках. Окрім безпосередньо лінійно-кутових вимірів проводять заміри температури та тиску на кожному пункті мережі, які враховують у подальших опрацюваннях результатів спостережень.

На об'єктах даної ГЕС та прилеглих до неї територіях у 80-х роках минулого століття було закладено мережу пунктів, яка використовується для контролю за станом напірного трубопроводу. Дана мережа складається з п'яти пунктів, розташованих безпосередньо на тілі трубопроводу (пункти U, 1, 2, 3, 4) та чотирьох пунктів на протилежній до трубопроводу горі (пункти A, C, P, F). Слід зазначити, що пункти A і C розташовані у підніжжі гори, а P і F на її вершині (див. рис. 2.12). Дана інженерно-геодезична мережа задовольняє вимоги необхідні для ведення моніторингу за деформаціями інженерних споруд.

Запропонований метод спостережень полягає у виконанні одночасних вимірів двома високоточними тахеометрами з двох вершин трикутника на третю, де розташовувалась призма. Лінію між тахеометрами називаємо базисною. Для наших спостережень вибрано 28-ть базисів, з яких виконували спостереження на інші пункти мережі. Враховуючи особливості розташування гідроелектростанції, неможливим

було виміряти лінію Р-4, відповідно виконати спостереження семи трикутників (А-Р-4, С-Р-4, Р-Ф-4, Р-У-4, Р-1-4, Р-2-4, Р-3-4). В загальному для просторової мережі Тербле-Ріцької ГЕС виконано лінійно-кутові виміри для 77 трикутників спостережень, що утворені двома тахеометрами та призмами (табл. 3.21).

Таблиця 3.21

Мережа трикутників лінійно-кутових вимірів

№ т-ка	Базисна лінія	Відбивач	№ т-ка	Базисна лінія	Відбивач	№ т-ка	Базисна лінія	Відбивач	№ т-ка	Базисна лінія	Відбивач
1	А-С	Р	2	А-С	Ф	3	А-С	У	4	А-С	1
5	А-С	2	6	А-С	3	7	А-С	4	8	А-Р	Ф
9	А-Р	У	10	А-Р	1	11	А-Р	2	12	А-Р	3
13	А-Ф	У	14	А-Ф	1	15	А-Ф	2	16	А-Ф	3
17	А-Ф	4	18	А-У	1	19	А-У	2	20	А-У	3
21	А-У	4	22	А-1	2	23	А-1	3	24	А-1	4
25	А-2	3	26	А-2	4	27	А-3	4	28	С-Р	Ф
29	С-Р	У	30	С-Р	1	31	С-Р	2	32	С-Р	3
33	С-Ф	У	34	С-Ф	1	35	С-Ф	2	36	С-Ф	3
37	С-Ф	4	38	С-У	1	39	С-У	2	40	С-У	3
41	С-У	4	42	С-1	2	43	С-1	3	44	С-1	4
45	С-2	3	46	С-2	4	47	С-3	4	48	Р-Ф	У
49	Р-Ф	1	50	Р-Ф	2	51	Р-Ф	3	52	Р-У	4
53	Р-У	2	54	Р-У	3	55	Р-1	4	56	Р-1	3
57	Р-2	3	58	Ф-У	1	59	Ф-У	2	60	Ф-У	3
61	Ф-У	4	62	Ф-1	2	63	Ф-1	3	64	Ф-1	4
65	Ф-2	3	66	Ф-2	4	67	Ф-3	4	68	У-1	2
69	У-1	3	70	У-1	4	71	У-2	3	72	У-2	4
73	У-3	4	74	1-2	3	75	1-2	4	76	1-3	4
77	2-3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Лінійно-кутові виміри виконували високоточними роботизованими електронними тахеометрами TPS-1201 та TSA-2003 швейцарської фірми Leica Geosystems, технічні характеристики яких наведено в таблиці 3.22. Для врахування поправок за атмосферу та рефракцію виконували заміри тиску та температури на всіх пунктах мережі впродовж всіх днів спостережень.

**Технічні характеристики високоточних роботизованих тахеометрів
TCA-2003 та TPS-1201 фірми Leica Geosystems**

Назва тахеометра	Кутова точність	Точність виміру на призму
TCA-2003	0,5"	1 мм + 1ppm
TPS-1201	1"	2 мм + 2ppm

Просторове розташування пунктів інженерно-геодезичної мережі ГЕС має суттєвий недолік – це великі повітряні “ями” між пунктами Р, F, U, 1, 2 (див. рис. 3.11), що значно спотворюють результати вимірів. Враховуючи вищезазначене для подальших досліджень параметрів деформацій використовували лише лінійні виміри, оскільки кутові не задовільняли необхідну точність.



Рис. 3.11 Спостереження з пункту Р на пункти U, 1, 2, 3, 4 інженерно-геодезичної мережі Теремле-Ріцької ГЕС

Після завершення спостережень виконано врівноваження інженерно-геодезичної мережі модифікованим параметричним та класичним параметричним методами. Вихідними даними для виконання врівноваження були різниці вимірних ліній у кожному трикутнику вимірів (табл. 3.21). Під час виконання врівноваження лінії між пунктами А, С, Р, F вважали сталими, а лінії в трикутниках 1, 2, 8, 28, позбавлені спотворень. Після виконання врівноваження двома методами отримали поправки у вимірні величини ліній (див. табл. 3.23, рис. 3.12).

Таблиця 3.23

Поправки у вимірні величини ліній отримані після врівноваження мережі модифікованим параметричним та класичним парметричним методами

№ т-ка спостережень	Поправки, мм			№ т-ка спостережень	Поправки, мм		
	Мод метод	Клас метод			Мод метод	Клас метод	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-7,3	-2,4	-6,3	2	1,1	2,1	7,1
3	9,5	-4,2	-7,7	4	11,1	5,3	7,0
5	-9,3	-3,6	-2,8	6	1,0	4,6	-1,8
7	1,0	-3,2	-2,1	8	-4,2	3,6	-0,3
9	4,0	-8,7	-3,8	10	-9,5	5,4	6,5
11	-6,4	3,1	-1,2	12	6,8	4,3	0,5
13	4,4	1,2	-1,0	14	0,5	2,4	-9,8
15	-7,9	12,8	-7,3	16	4,5	-3,4	8,0
17	-4,6	3,2	-3,2	18	3,1	4,6	-1,8
19	12,0	-5,5	1,6	20	1,5	-4,3	-0,7
21	-6,7	5,2	-4,9	22	7,7	0,5	-4,8
23	12,6	-4,1	5,3	24	-12,3	5,2	-2,1
25	-8,6	-1,3	-7,7	26	1,1	-6,8	5,6
27	-4,2	1,7	5,6	28	5,9	-2,6	-10,2
29	16,0	-10,2	-3,5	30	3,0	-3,9	-4,8
31	-4,8	2,9	1,8	32	-10,0	-3,1	5,3
33	1,4	-5,7	5,0	34	0,0	3,3	-3,8
35	-2,1	8,9	-7,1	36	5,7	0,6	-11,4
37	-2,2	-1,5	-5,0	38	-2,2	1,9	1,4
39	0,7	8,7	2,4	40	-5,6	4,0	3,6
41	12,5	-1,5	-7,3	42	0,3	-1,7	2,5
43	-4,5	5,1	7,2	44	-10,3	4,2	-4,5
45	5,8	-1,6	7,9	46	-1,8	-5,8	-5,2
47	15,1	-7,9	-3,2	48	-6,5	4,5	-10,4
49	-4,9	6,9	1,5	50	-0,2	-3,0	-7,5

1	2	3	4	5	6	7	8
51	7,1	7,0	6,9	52	-15,4	5,2	-1,9
53	4,7	-8,3	3,1	54	-0,7	7,1	-2,5
55	0,9	0,4	6,1	56	8,4	-1,2	-9,6
57	8,1	4,6	-0,7	58	11,5	-7,0	5,9
59	-15,9	6,8	2,7	60	-7,4	10,3	8,0
61	-4,3	-1,6	9,9	62	4,5	1,2	4,0
63	-2,0	6,9	-6,9	64	-0,7	-7,0	2,7
65	7,4	-7,1	-7,5	66	-7,3	-1,2	6,4
67	-8,5	1,5	3,8	68	-1,5	3,7	-7,5
69	0,7	8,0	0,2	70	4,0	0,0	-5,8
71	9,9	-5,5	-8,1	72	-9,3	3,9	0,7
73	0,6	5,1	7,8	-	-	-	-

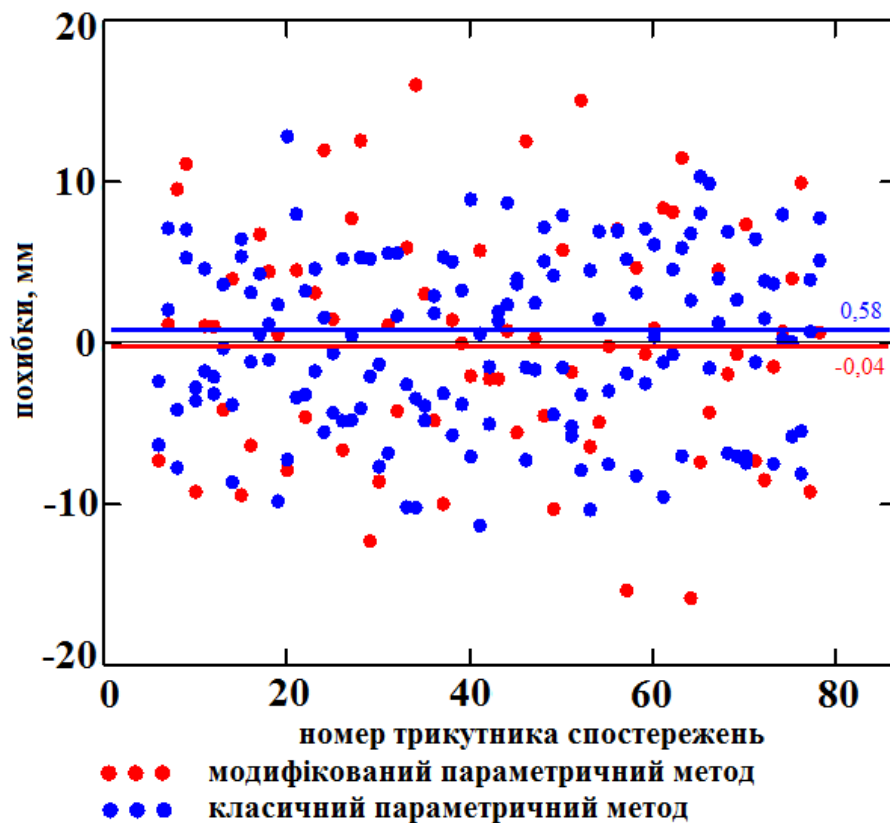


Рис. 3.12 Розподіл поправок в вимірних лініях після врівноваження мережі модифікованим параметричним та класичним параметричним методами

З рис 3.12 видно, що при врівноваженні мережі класичним параметричним методом систематика залишається. Середня поправка у вимірній лінії після врівноваження модифікованим параметричним методом становить $-0,04$ мм, класичним параметричним методом – $0,58$ мм, що ще раз підтверджує присутність

систематичних похибок після врівноваження мережі класичним параметричним методом.

За результатами врівноваження мережі двома методами (модифікованим параметричним та класичним параметричним) були визначені параметри компонент деформацій прогонів напірного трубопроводу: $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ - відносні зміщення по осям X,Y,Z (формули 2.15-2.17) і γ - загальне зміщення (формула 2.18) та Δ - дилатація (стиску або розтягу, формула 2.22). Обчислені значення компонент деформацій є безрозмірними величинами і представлені на рисунках 3.13-3.17.

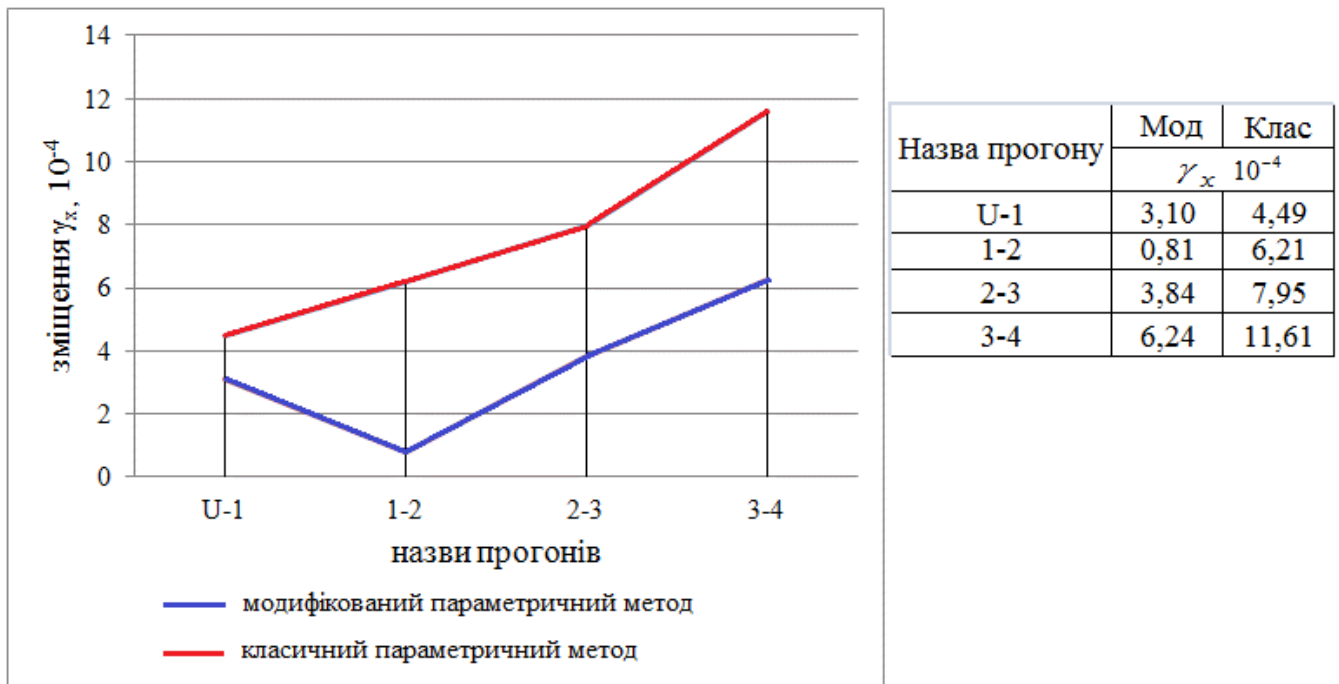
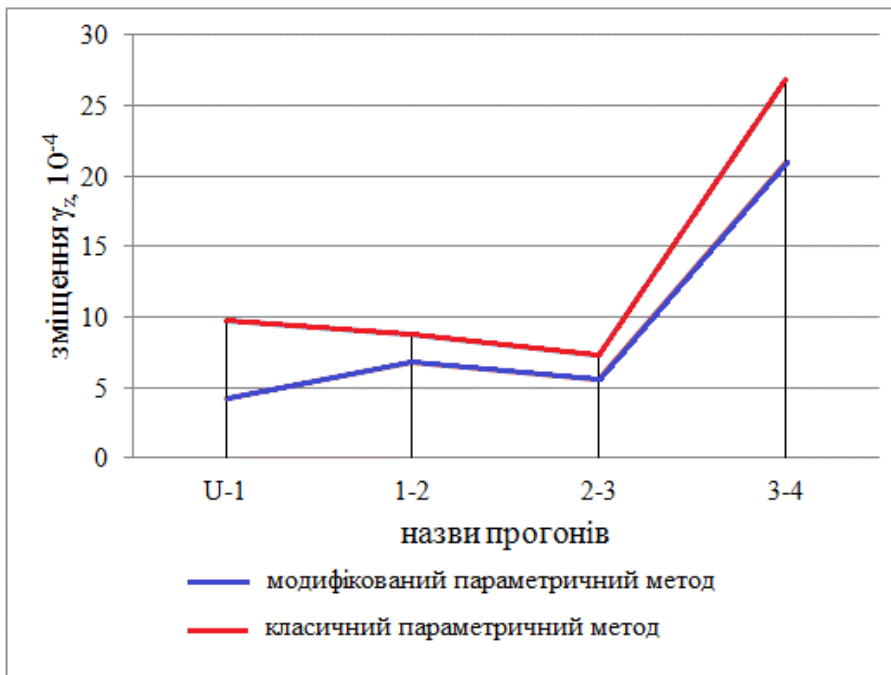
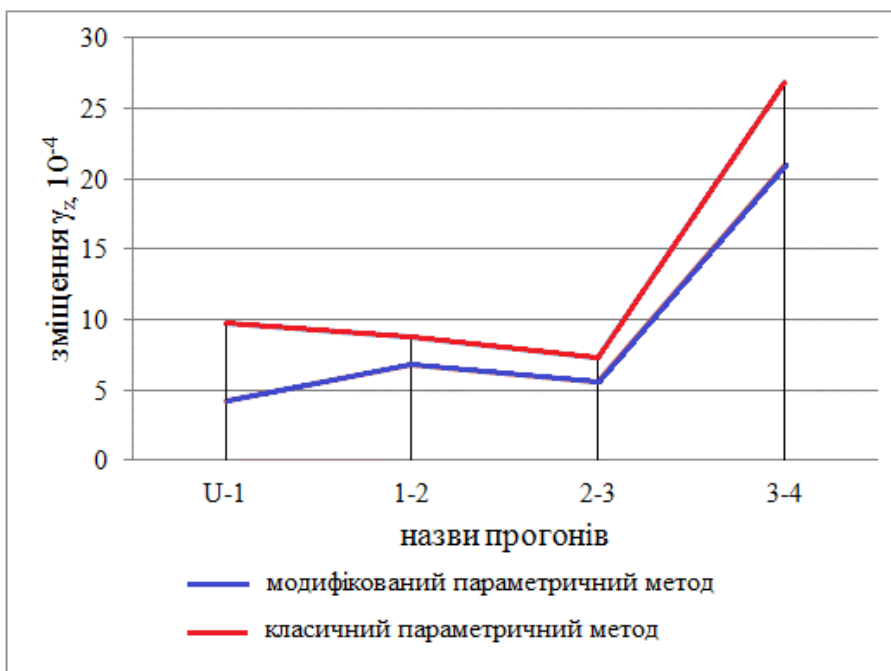
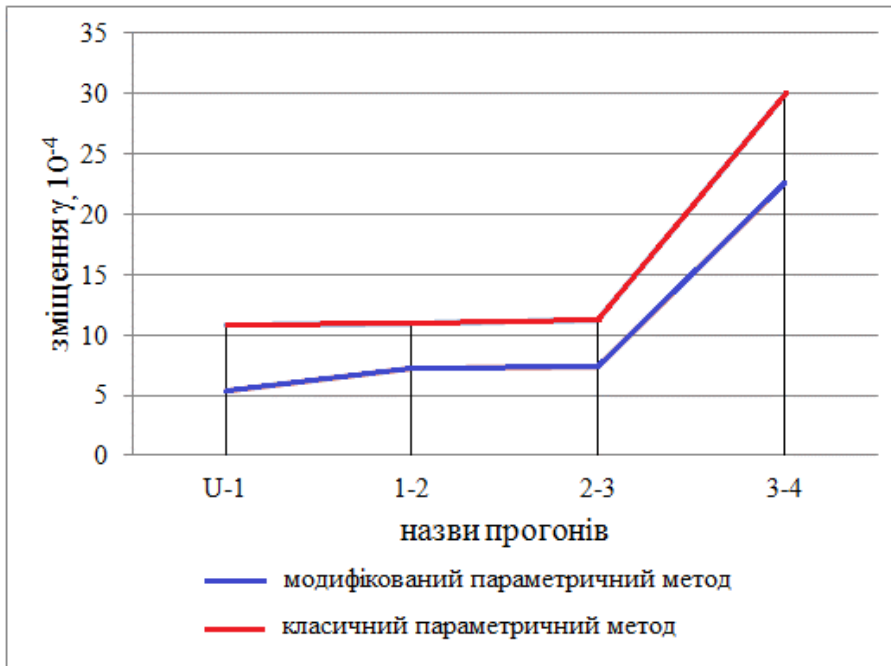
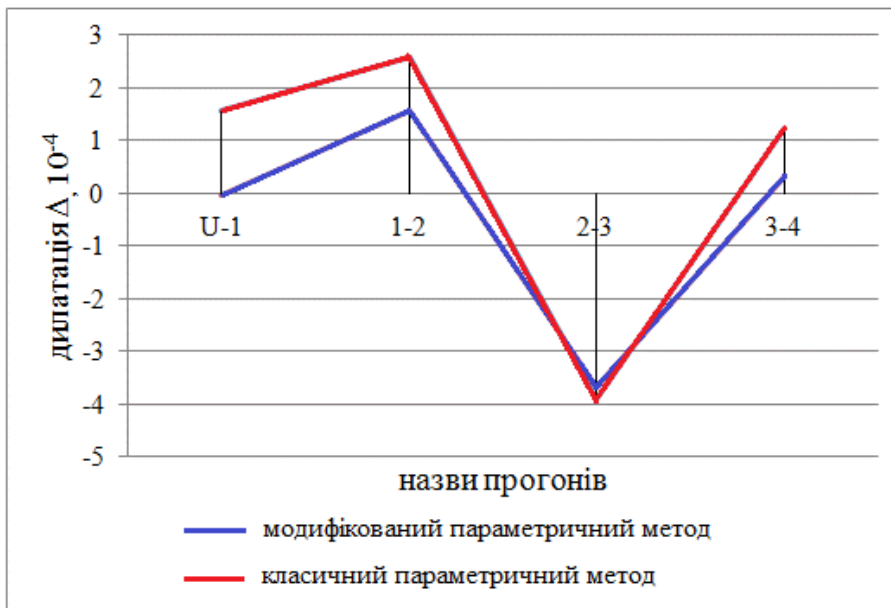


Рис. 3.13 Розподіл відносних зміщень γ_x

Рис. 3.14 Розподіл відносних зміщень γ_y Рис. 3.15 Розподіл відносних зміщень γ_z



Назва прогону	Мод γ	Клас 10^{-4}
U-1	5,34	10,83
1-2	7,25	11,02
2-3	7,41	11,29
3-4	22,56	29,89

Рис. 3.16 Розподіл відносних зміщень γ 

Назва прогону	Мод Δ	Клас 10^{-4}
U-1	0,04	1,55
1-2	0,99	2,60
2-3	-2,63	-3,91
3-4	0,32	1,25

Рис. 3.17 Розподіл відносних зміщень Δ

Аналізуючи рисунки 3.13-3.17, необхідно відмітити, що розподіл відносних зміщень параметрів компонентів деформацій, отриманих на основі результатів врівноваження мережі модифікованим параметричним методом, дає більш зладжений результат.

В таблиці 3.24 приведено оцінку точності отриманих параметрів деформацій (формули 2.31-2.33, 2.35).

Таблиця 3.24

Оцінка точності параметрів деформацій

Назва прогону	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас	Мод	Клас
	$M_{\gamma_x}, 10^{-4}$		$M_{\gamma_y}, 10^{-4}$		$M_{\gamma_z}, 10^{-4}$		$M_{\Delta}, 10^{-4}$	
U-1	1,23	1,25	2,36	2,94	1,04	1,18	1,88	2,44
1-2	1,17	1,34	2,22	2,51	0,89	0,70	0,91	1,33
2-3	1,36	1,21	1,10	1,83	0,56	0,65	1,32	1,54
3-4	0,98	1,03	1,24	1,75	1,11	1,36	0,69	1,27

Аналізуючи таблицю 3.24, можна стверджувати, що розподіл відносних зміщень дає менші величини відповідних зміщень, що вказує на часткове усунення систематичних похибок з результатів вимірів, які приводять до завищення результатів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. За результатами реальних ГНСС-вимірів доведено ефективність модифікованого параметричного методу опрацювання ГНСС-мереж порівняно з класичним параметричним методом. Помилки визначених координат пунктів ГНСС мереж модифікованим параметричним методом порівняно з класичним параметричним для мережі з ідеальними умовами видимості супутників та часу спостережень є на 10÷20% меншими.

2. Для ГНСС-мереж з виміряними в екстремальних умовах векторами (частково обмежена видимість супутників та занижена тривалість вимірів векторів) помилки визначення координат пунктів модифікованим параметричним методом врівноваження на 10÷50% є меншими ніж класичним параметричним, що підтверджує ефективність застосування модифікованого параметричного методу.

3. На основі апріорного розрахунку точності ГНСС-мереж, виконаного модифікованим параметричним та класичним параметричним методами врівноваження, встановлено, що для класичного параметричного методу апріорні похибки на 60% є меншими ніж реальні помилки, а для модифікованого параметричного методу вони відрізняються у межах 20%, що вказує на значно більшу достовірність апріорної оцінки точності модифікованого параметричного методу врівноваження.

4. Розроблений модифікований параметричний метод врівноваження інженерно-геодезичних мереж необхідно використовувати при виконанні опрацювання ГНСС-вимірів, виконаних на гідротехнічних спорудах зі складним рельєфом та обмеженими умовами видимості супутників.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літературних джерел з геодезичного моніторингу деформацій інженерних споруд встановлено, що найефективнішими методами дослідження деформацій є комплексні геодезичні та геотехнічні методи, які дозволяють отримати найбільш достовірні результати, однак в автоматичних системах моніторингу проявляється вагомий вплив систематичних похибок при опрацюванні корельованих між собою результатів вимірів в режимі реального часу, що вимагає розробки та впровадження нових методів усунення систематичних похибок.

2. На основі теоретичного обґрунтування нового модифікованого параметричного методу опрацювання інженерно-геодезичних мереж та статистичних випробувань доведено його переваги порівняно з класичним параметричним методом та встановлено зростання ефективності модифікованого параметричного методу при наявності систематичних похибок та при збільшенні кількості пунктів і жорсткості мережі.

3. Вперше виведено формули для оцінки точності визначення деформаційних параметрів прогонів напірних трубопроводів ГЕС залежно від точності геодезичних вимірів та за результатами експериментальних досліджень на Тербле-Ріцькій ГЕС встановлено, що точність визначення деформацій залежить від конфігурації напірного трубопроводу, схеми вимірів, точності вимірів та вихідних даних.

4. За результатами опрацювання реальних ГНСС-мереж доведено, що ефективність використання модифікованого параметричного методу порівняно з класичним параметричним досягає 10÷20% для мереж з ідеальними умовами видимості супутників та задовільною тривалістю спостережень, а для мереж з екстремальними умовами (частково обмежена видимість супутників та занижена тривалість вимірів векторів) помилки визначення координат пунктів при опрацюванні модифікованим параметричним методом є на 10÷50% менші ніж

класичним параметричним, що підтверджує ефективність застосування модифікованого параметричного методу.

5. На основі апріорного розрахунку точності ГНСС мереж, виконаного модифікованим параметричним та класичним параметричними методами врівноваження, встановлено, що похибки, визначені класичним параметричним методом, є на 60% меншими ніж реальні помилки, а для модифікованого параметричного методу вони відрізняються у межах 20%, що вказує на значно більшу достовірність апріорної оцінки точності модифікованого параметричного методу та дозволяє його рекомендувати для врівноваження інженерно-геодезичних мереж, особливо на гідротехнічних спорудах зі складним рельєфом та обмеженими умовами видимості супутників.

6. За результатами вимірів на Теремле-Ріцькій ГЕС експериментально підтверджено достовірність розробленої методики апріорної оцінки точності параметрів деформацій напірних трубопроводів ГЕС та ефективність вилучення систематичних похибок з результатів спостережень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Accuracy comparison between techniques for the establishment of calibration intervals: application to atomic clocks / [D. Macii, P. Tavella, E. Perone та ін.]. // Instrumentation and Measurement. – 2004. – Vol. 53, Issue 4. – P. 1167–1172.
2. Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration / [M. Eckl, R. Snay, T. Soler та ін.]. // Journal of geodesy. – 2001. – No. 75. – P. 633–640.
3. Badley R. Connecting continents / Ruth Badley. // Reporter. – 2014. – №71. – P. 3–5.
4. Bayrak T. Monitoring temporal behavior of the Yamula Dam / Temel Bayrak. // Shaping the Change XXIII FIG Congress. Munich, Germany. – 2006.
5. Böhm J. Die Messungsfehler und die statistischen Reihen / J. Böhm. // Z. f. Vern. – 1967. – №92. – P. 6.
6. Böhm J. Theoria der gesamten Fehler / J. Böhm. // Z. f. Vern. – 1967. – №92. – P. 3–4.
7. Böhm J. Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische statistik in der Geodesie / J. Böhm. // Vermessungstechnik. – 1967. – №15. – P. 7–11.
8. Böhm S. Geod. und Geophys. Veröff. – 1976. – Vol. 6. – P. 21– 28.
9. Binder N. Moving London safely forward / Natalie Binder. // Reporter. The Global Magazine of Leica Geosystems. – 2014. – №71. – С. P. 18–21.
10. Church C. Novel Method to Measure Array Manifolds of GHCC Adaptive Antennas / C. Church, A. O'Brien, I. Gupta. // Navigation. – 2011. – Vol. 58, Issue 4. – P. 345– 356.
11. Concrete Dam Monitoring in Montereale Valcellina (IT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.leica-geosystems.ru/downloads123/zz/general/general/TruStories/Concrete_Dam_Monitoring_in_Montereale_Valcellina_TRU_en.pdf.
12. Fundamental bending mode and vibration monitoring with inclinometer and accelerometer on high-rise buildings subject to wind loads [Електронний ресурс] / [X. Li, C. Rizos, Y. Tamura та ін.] – Режим доступу до ресурсу: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/lix_etal2010a.pdf.

13. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas / [R. Schmid, P. Steigenberger, G. Gendt та ін.]. // *Journal of Geodesy*. – 2007. – Vol. 81, Issue 12. – P. 781–798.
14. Global modeling 2nd-order ionospheric delay and its effects on GNSS precise positioning / H.Zhang, H. Lv, M. Li, C. Shi. // *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. – 2011. – Vol. 54, No. 6. – P. 1059–1067.
15. Gosligal R. Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning / R. Gosligal, R. Lindenbergh, N. Pfeifer. // *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. – Vol. XXXV. – P. 6.
16. GPS calendar [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://rvdi.com/freebies/gpscalendar.html>.
17. Groenhout K. Australian survey. – 1978. – Vol. 29, No. 3. – P. 174-190.
18. Henrique M. Measuring Inclinations in Cabril Dam with an Optoelectronic Sensor / M. Henrique, J. Lima, S. Oliveira. // *FIG Working Week 2012. Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage*. Rome, Italy, 6-10 May. – 2012.
19. How hybrid GPS-based surveying techniques can further assist with structural design and construction [Електронний ресурс] / [X. Li, A. Yoshida, Y. Tamura та ін.] – Режим доступу до ресурсу: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/lix_etal2008a.pdf.
20. Illner I. Deformation measuring / I. Illner. // *Proc. 3rd Int. Symp. Budapest*. – 1983. – P. 417–432.
21. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates / [M. Fritsche, R. Dietrich, C. Knöfel та ін.]. // *Geophysical research letters*. – 2005. – Vol. 32, Issue 23. L23311, doi:10.1029/2005GL024342.
22. João C. The Geodetic Surveying Methods in the Monitoring of Large Dams in Portugal / C. João, H. João. // *FIG XXII International Congress*. Washington D.C. USA, April 19-26. – 2002.

23. Kadaj R. New algorithms of GPS post-processing for multiple baseline models and analogies to classical geodetic networks / R. Kadaj // *Geodesy and cartography*. – 2008. – Vol. 57, No. 2. – P. 61-79.
24. Lau L. A New Signal-to-Noise-Ratio Based Stochastic Model for GNSS High-Precision Carrier Phase Data Processing Algorithms in the Presence of Multipath Errors / L. Lau, P. Cross // *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION ITHCC 2006)*, Fort Worth, TX. – 2006. – P. 276-285.
25. Lambrou E. Spatial marking of 3D networks points for the monitoring of modern constructions / E. Lambrou, G. Pantazis, K. Nikolitsas // *13th FIG Symposium on geodesy for geotechnical and structural engineering*, Lisbon, Portugal. – 2008. – P. 1-10.
26. Least squares techniques for GPS receivers positioning filter using pseudo-range and carrier phase measurements / M. Mosavi, S. Azarshahi, I. Emamgholipour, A. Abedi. // *Iranian Journal of electrical and electronic engineering*. – 2014. – Vol. 10, No. 1. – P. 18–26.
27. Lehmuller K. Keeping a vigilant eye / Katherine Lehmuller. // *Reporter*. – 2016. – №76. – P. 16–18.
28. Leica GeoMoS [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.gfk-leica.ru/katalog/programmnoe_obespechenie/po_leica/leica_geomos/.
29. Longstreet B. Monitoring Toronto’s Union Station / Brad Longstreet. // *Reporter*. – 2011. – №65. – P. 25–27.
30. Mader G. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey / G. Mader. // *GPS Solutions*. – 1999. – Vol. 3, Issue 1. – P. 50–58.
31. Maidment D. *Handbook of Hydrology* / D.R. Maidment. – New York: McGraw-Hill, 1992. – 1424 p.
32. Monitoring Europe’s Tallest Building [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.leica-geosystems.ru/downloads123/zz/general/general/TruStories/Monitoring_Europes_Tallest_Building_TRU_en.pdf.

33. Monitoring to Secure an Area With Hydrogeological Instability [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.leica-geosystems.ru/downloads123/zz/general/general/TruStories/Monitoring_to_Secure_an_Area_With_Hydrog_Instability_TRU_en.pdf.
34. Piantelli E. Monitoring Mother Nature's Forces / Elena Piantelli. // Reporter. – 2013. – №69. – P. 3–5.
35. Resnik B. Analyse von automatisierten Deformationsmessungen mit Wavelet Transformation. / B. Resnik // VDVmagazin. – 2007. – №3. – P. 200–203.
36. Review of Higher Order Ionospheric Refraction Effects on Dual Frequency GPS / [E. Petrie, M. Hernández-Pajares, P. Spalla та ін.]. // Surveys in Geophysics. – 2011. – Vol. 32, Issue 3. – P. 197–253.
37. Rothacher M. Comparison of absolute and relative antenna phase center variations / M. Rothacher // GPS Solutions. – 2001. – Vol. 4, Issue 4. – P. 55-60.
38. Saal K. Monitoring Pays Off / Konrad Saal. // Reporter. – 2012. – №67. – P. 6–7.
39. Scripps Orbit and Permanent Array Center [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://sopac.ucsd.edu>.
40. Shaw M. Modernization of the Global Positioning System / M. Shaw, K. Sandhoo, D. Turner // Journal of GPS World. – 2000. – Vol. 11, No. 9. – P. 36-44.
41. Speed V. Controlling The Bow / Vicki Speed. // Reporter. – 2012. – №66. P. 12–14.
42. Track Monitoring Traunstein, Germany [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.leica-geosystems.ru/downloads123/zz/general/general/TruStories/Rail_Track_Monitoring_Germany_TRU_en.pdf.
43. Tresl J. Analýza variance v souborech s neúplným počtem měření / J. Tresl. // Geodeticky a kartograficky obzor. – 1983. – Vol. 29, No. 1. – P. 5–9.
44. Tretyak K. Modified parameter methods of researching GNSS networks with correlative measurements and systematic errors / K. Tretyak, K. Smoliy // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2017. – №2(34). – С.55-67.

45. Van Cranenbroeck J. Controlling Vertical Towers / Joël van Cranenbroeck. // Reporter. – 2010. – №63. – P. 29–31.
46. Wan A. Monitoring high-rise building deformation using Global Positioning System [Электронный ресурс] / A. Wan, Z. Othman, H. Najib – Режим доступа до ресурсу: <http://www.gisdevelopment.net/technology/gps/techgp0024.htm>.
47. Weiss M. GPS Signal Integrity Dependencies on Atomic Clocks / M. Weiss, P. Shome, R. Beard. // 38th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. – 2007. – P. 439–448.
48. Whitworth J. The Shard: London's New Skyline / James Whitworth. // Reporter. – 2012. – №67. – P. 8–10.
49. Yigit C. Monitoring of tall building's dynamic behavior using precision inclination sensors [Электронный ресурс] / C. Yigit, C. Inal, M. Yetkin – Режим доступа до ресурсу: http://www.fig.net/commission6/lisbon_2008/papers/pas12/pas12_04_yigit_mc069.pdf.
50. Zeiner A. Swiss Bridge, Visible World-wide / Agnes Zeiner. // Reporter. – 2011. – №65. – P. 28–29.
51. Автоматизированная система геодезического мониторинга деформаций, измерения в режиме реального времени [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.soldata.com.ua/solfrey/iweb.nsf/pages/mniting-dfmcij-ciklp-kntv.2283EA2272F45E7DC125795800350E83>.
52. Автоматизированный геодезический мониторинг жилого дома и подпорной стенки по Краснозвездному проспекту, 14 в Киеве [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.soldata.com.ua/solfrey/iweb.nsf/pages/vtmtizvnij-gdzicnij-mnting-dfmcj-t-dn-n-ppkt-cvnzanm-14.2283EA2272F45E7DC125795800350E83>.
53. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Том. 2] / Антонович К.М. – Москва: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 311 с.

54. Баран П.І. Геодезичні спостереження за деформаціями об'єкта "Укриття" на Чорнобильській АЕС / П.І. Баран, В.Г. Сушко, О.В. Холодюк, В.Я. Чорнокін // Вісник геодезії та картографії. – 1999. – № 1. – С. 18–23.
55. Белоусов В.В. Основы геотектоники / В.В. Белоусов – Москва: Недра, 1989. – 382 с.
56. Березюк О. Безпека життєдіяльності [Електронний ресурс] / О. Березюк, М. Лемешев – Режим доступу до ресурсу: <http://posibnyku.vntu.edu.ua/bjd/index.htm>.
57. Бизов В. Основы динамичной та прикладной геологии / В. Бизов, І. Паранько // Динамічна геологія / В. Бизов, І. Паранько. – Кривий Ріг: Мінерал, 2000. – С. 205.
58. Борисенков Б. Критерии случайности рядов измерений / Б. Борисенков. // Инж. геод. межвед. респ. науч. сб. – 1966. – №3.
59. Борисенков Б. Оценка точности результатов измерений в случае систематического смещения центра распределения и дисперсии / Б. Борисенков. // Инж. геод. межвед. респ. науч. сб. – 1966. – №3.
60. Бородин З. / З. Бородин, В. Фурсенко. // Изв. Высш. Учеб. Заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1976. – №6. – С. 49–55.
61. Бондаренко И. Современные методы мониторинга за техническим состоянием зданий и сооружений в процессе их эксплуатации [Електронний ресурс] / И. Бондаренко, А. Мартынов, А. Мокасеєв. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.pamag.ru/prensa/sovremenniy-monitoring>.
62. Брайт П. Измерение осадок и деформаций сооружений геодезическими методами / П. Брайт, Е. Медвецкий. – Москва: Геодезиздат, 1959.
63. ВАТ ЕК "Закарпаттяобленерго" Тересля-Ріцька ГЕС. Фотоальбом. – Ужгород, 2006. – 88 с.
64. Видуев Н. Дисперсионный анализ в теории и практике геодезических измерений / Н. Видуев, Г. Кондра. – Москва: Недра, 1968.
65. Винклер Г. Петрология метаморфических горных пород / Г. Винклер. – Москва: Мир, 1973.
66. Войтенко С. Визначення кренів інженерних споруд методом наземного лазерного сканування / С. Войтенко, Р. Шульц, М. Білоус // Сучасні досягнення геодезичної

- науки і виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. – Випуск I (17). – С. 144–150.
67. Войтенко С. Геодезичні роботи в будівництві: Навч. посіб. / С. Войтенко. – Київ: ІСДО, 1993. – 144 с.
68. Гайдаев П. А. Теория математической обработки геодезических измерений / П. А. Гайдаев, В. Д. Большаков. – Москва: Недра, 1969.
69. Глущенко В. Решение Trimble для мониторинга / В. Глущенко, И. Торопа. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2013. – Випуск I (25). – С. 20–23.
70. Гречанинов В.Ф. Загальні вимоги до розвитку і розміщення потенційно небезпечних виробництв з урахуванням ризику надзвичайних ситуацій техногенного походження / Наукові керівники: член-кореспондент НАН України С.І.Дорогунцов і генерал-лейтенант В.Ф. Гречанинов. – Київ: НАНУ, 1995.
71. Гофштейн І. Вивчення сучасних рухів земної кори в Карпатах / І. Гофштейн, В. Сомов, В. Кузнєцова. – Київ: Наукова думка, 1971. – 128 с.
72. Демедюк М. Вплив Рікського тектонічного розлому на деформації напірного трубопроводу Теремля-Рікської ГЕС / М. Демедюк, І. Сідоров, К. Третяк. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 1993. – Випуск 55. – С. 14–22.
73. Депутат О. Цивільна оборона: підручник/ О. Депутат, І. Коваленко, І. Мужик ; За редакцією В.С. Франка. – 2-ге вид., доп. – Львів: Афіша, 2001. – 357 с.
74. Добровольський В. Основи теорії екологічних систем: Навч. посіб. / В. Добровольський. – Київ: ВД Професіонал, 2005. – 272 с.
75. Дроздов Н. Проблемы математической обработки геодезических сетей / Н. Дроздов // Материалы Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1979. – С. 11–14.
76. Евстафьев О. Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования / О. Евстафьев // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 21–24.
77. Жарницкий В. Я. Совершенствование теории и методов оперативного геотехнического контроля качества возведения каменно-земляных плотин и прогноза их деформаций по результатам строительства : автореф. дис. на здобуття

наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.23.07 "Гидротехническое строительство"
/ Жарницкий В. Я. – Москва, 2006. – 295 с.

78. Иванов Е. Высшая геодезия. 1977, №3. – С. 31–39
79. Изотов А. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах (методическое руководство) / Изотов А.А. и др. – Москва: ЦНИИГАиК, 1985.
80. Исключение систематических погрешностей [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
http://studme.org/17800309/tovarovedenie/isklyuchenie_sistematicheskih_pogreshnost_eu.
81. Інформаційний бюлетень про стан геологічного середовища Україниу 1994-1995 роках. – Київ: ДГП “Геопргноз”, 1997.
82. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечнихекзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. – Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”, 2011. – 88 с.
83. Карпик А.П. Оценка состояния Саяно-Шушенской плотины в период нормальной эксплуатации по данным геодезических измерений / А.П. Карпик, Н.И. Стефаненко // Известия высших учебных заведений. Раздел геодезия и аэросъемка. – 2009. – №5. – С. 3–10.
84. Картохема каскаду 6 водосховищ на Дніпрі, Україна. [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу:
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40096560>.
85. Каскад верхневолжских ГЭС: наблюдения за осадками сооружений [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<http://www.geodinamika.ru/proekty/inzhenernaya-geodeziya/kaskad-verhnevolzhskih-ges:-nablyudeniya-za-osadkami-sooruzhenij>.
86. Классификация систематических погрешностей [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.nntu.ru/RUS/fakyl/VECH/metod/metrology/5_1.htm.

87. Климчук Л. Звіт “Узагальнення матеріалів інженерно-геологічного довивчення території України з метою підготовки геологічного забезпечення протизсувних заходів та УІАС НС на державному рівні” / Л.М. Климчук та інші. 2009.
88. Климчук Л. Сучасні інженерно-геологічні умови України як складова безпеки життєдіяльності / Л. Климчук, П. Блінов. – Київ. – 2008.
89. Ключин Е. Инженерная геодезия: [учебник для вузов] / Е. Ключин, М. Киселев, Д. Михелев, В. Фельдман; под ред. Д. Ш. Михелева. – 4-е изд., испр. – Москва: Издательский центр "Академия", 2004. – 480 с.
90. Короновский Н. Напряженное состояние земной коры / Н.В. Короновский // Соросовский Образовательный Журнал. – 1997. – № 1. – С.50-56.
91. Кропоткин П. Теория тектоники литосферных плит и геодезические измерения / П. Кропоткин // Природа. – 1992. – №7. – С. 42 – 43.
92. Крупнейшие аварии на ГЭС в мире за последние 50 лет [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://expert.ru/ratings/table_531121/.
93. Кукал З. Природные катастрофы / Кукал З. – Москва: Знание, 1985. – 240 с.
94. К аварии на Саяно-Шушенской ГЭС привела погоня за прибылью? [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.plotina.net/k-avarii-na-sayano-shushenskoj-ges-privela-pogonyu-za-pribylyu/>.
95. Лапін В. Безпека життєдіяльності людини: Навч. посіб. – 6-те вид., перероб. і доп. – Київ: Знання, 2007. – 332 с.
96. Ли В. Т. Создание системы геодезического деформационного мониторинга мостовых переходов Красноярской ГЭС [Электронный ресурс] / В. Т. Ли – Режим доступа до ресурсу: http://icentre-gfk.ru/article/a_sgdм-krasnoyarsk.htm.
97. Мазуров В. Деформационные предвестники Чуйского землетрясения 2003 года / В. Мазуров // Международная научно-техническая конференция, посвященная 225-летию МИИГАиК, "Геодезия". – Москва: Изд-во МГУГиК, 2004. – С. 447-451.
98. Маркузе Ю. И. Уравнивание и оценка точности плановых геодезических сетей. – Москва: Недра, 1983.

99. Методика выявления и оценки рациональной обстановки при разрушениях (авариях) атомных электростанций / В. Владимиров, О. Михеев, С. Хмель та ін. – Москва, 1989.
100. Миколук О. Українські сейсмологи: уберегти від некерованої стихії може правильне проектування житла [Електронний ресурс] / О. Миколук – Режим доступу до ресурсу: <http://www.day.kiev.ua/272695/>.
101. Мир в движении [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.rusnavgeo.ru/monitoring/>.
102. Миронов А. Деформационные процессы в литосфере и глобальная геодинамика Земли / А. Миронов А., Л. Латынина, В. Милюков – Госуд. астрон. ин-т им. П.К. Штернберга, «Сагитовские чтения», 2007. – С. 120-129.
103. Миченко І. Забезпечення життєдіяльності людини в навколишньому середовищі / І.М. Миченко. – Кіровоград, 1998. – 292 с.
104. Міхельов Д. Види деформації й причини їхнього виникнення [Електронний ресурс] / Д. Міхельов – Режим доступу до ресурсу: <http://lection.com.ua/geodesy/ingdz/vidi-deformatsiyi-y-prichini-yihnogo-viniknennya>.
105. Могильний С. Автоматизированная система геодезического мониторинга / С. Могильний, А. Шоломицкий, Е. Шмогун, В. Пригаров // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2010. – №1(19). – С.193-197.
106. Молчанов В. Центробежно-инерционный механизм глобальной тектоники литосферных плит / В. Молчанов, В. Параев // Электронный научно-информационный журнал, – 2004. – №1(22). – С. 1-19.
107. Мониторинговые системы Trimble [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.kmcgeo.com/Articles/MonitoringSystems.htm>.
108. Надзвичайні ситуації. Основи законодавства України. – Т.1. – Київ, 1998. – 544 с.
109. Надзвичайні ситуації. Основи законодавства України. – Т.2. – Київ, 1998. – 496 с.

110. Наиболее сильные наводнение в XX веке [Электронный ресурс] // Россия в окружающем мире. – 2001. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.rus-stat.ru/index.php?vid=1&year=2001&id=48>.
111. Николаев Н. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы / Н. Николаев. – Москва: Недра, 1988. – 491 с.
112. Никофоров Б. Совместное влияние случайных и систематических погрешностей / Б. Никофоров, Е. Рыхлюк. // Тр. Всес. н.-и. ин-та горн. геомехан. и маркшейд. дела. – 1968. – №68.
113. Орлов А. Труды МИИЗ. – 1975. – вып. 75. – С. 123-129.
114. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань: Навч. посіб. / П.М. Зазуляк, В.І. Гавриш, Е.М. Євсєєва, М.Д. Йосипчук. – Львів: Растр-7, 2007. – 408 с.
115. Островский А.Л., Гнатенко А. Д. // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. – 1982. – Вип. 36. – С. 83-94.
116. Паранько І. Загальна геологія / І. Паранько, А. Сіворонов, В. Євтехов. – Кривий Ріг: Вид. Мінерал, 2003. – 464 с.
117. Певнев А. О месте геодезического метода в решении проблемы прогноза землетрясений/ А. Певнев // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2007. – № 7. – С.61-73.
118. Перетягин Г. Автометрия №3. С. 119-130.
119. Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических горных пород / [М. Афанасьева, Н. Бардина, О. Богатиков та ін.]. – Москва: «Логос», 2001. – 768 с.
120. Президія національної академії наук. Постанова, 08.10.2008 N 244 Сейсмічність і сейсмічна небезпека території України [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.marazm.org.ua/house/7_66.html.
121. Проекты | Банкомсвязь [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.bkc.com.ua/ru/project>.
122. Промисловість. Географія основних галузей промисловості світу (енергетика, металургія, машинобудування, хімічна промисловість, лісова та деревообробна

промисловість, легка промисловість) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://ukrmap.su/uk-g11/1345.html>.

123. Ратушняк Г. С. Геодезичне забезпечення будівництва [Ч. 2] / Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Бікс Ю. С., Вовк Т. Ю. // навч. посіб. – Вінниця: ВНТУ, 2014. — 99 с.
124. Ратушняк Г. Геодезичні роботи в будівництві / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 182 с.
125. Реализованные проекты в России [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://icentre-gfk.ru/projects/realpro.htm>.
126. Резник Б.Е. Непрерывные геодезические измерения деформаций строительных конструкций эксплуатируемых сооружений / Резник Б.Е. // Геопрофи. – 2008. – №4. – С. 4-10.
127. Рішення про міждержавну науково-технологічну програму створення системи сейсмологічного моніторингу територій держав-учасниць СНД [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nau.kiev.ua/nau10/ukr/getcnt.php?uid=1014.810.0&nobreak>.
128. Руттен М. Геология западной Европы/ М. Г. Руттен // Науки о Земле, Т.46. – Москва: Мир, 1972. – С. 446.
129. Самые крупные аварии на ГЭС [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://myelectro.com.ua/98-gidroenergetika/132-samy-e-krupnye-avarii-na-ges>.
130. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві: ДБН В.1.3-2:2010 – [Чинний від 2010-01-21]. – Київ: МінрегіонбудУкраїни, Національні стандарти України, 2010. – 70 с.
131. Систематические погрешности [Електронний ресурс] // Базовая метрологическая служба Узбекского агентства связи и информатизации – Режим доступу до ресурсу: http://metrolog.aci.uz/book_4.3.htm.
132. Систематические погрешности [Електронний ресурс] // Метрогология и стандартизация – Режим доступу до ресурсу: <http://metrologiya.ru/index.php?action=full&id=33>.

133. Смирнов Н. Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии / Н. Смирнов, Д. Белугин. – Москва: Недра, 1969.
134. Смолій К. Аналіз сучасних геодезичних та геотехнічних методів моніторингу за деформаціями інженерних споруд / К.Б. Смолій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2015. – №1(29). – С.87-89.
135. Смолій К. Дослідження деформацій напірних трубопроводів / К.Б. Смолій, К.Р. Третьак // Зб. матеріалів XVI Міжнародного науково-технічного симпозиуму “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS-технології”. – Алушта (Крим). – 2011. – С. 64-66.
136. Смолій К. Дослідження зміщення напірного трубопроводу Теремля-Рікської ГЕС на основі одночасних спостережень високоточними тахеометрами / К.Б. Смолій // Зб. матеріалів XVII Міжнародного науково-технічного симпозиуму “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS-технології”. – Алушта (Крим). – 2012. – С. 269-270.
137. Смолій К. Дослідження деформацій архітектурних споруд на прикладі будинку на вулиці Князя Романа у Львові / К.Б. Смолій, Ю.І. Голубінка // Зб. матеріалів XV Міжнародного науково-технічного симпозиуму “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS-технології”. – Алушта (Крим). – 2010. – С. 260-262.
138. Смолій К. Комплексне дослідження стану пам'ятки архітектури в умовах щільної забудови центральної частини м. Львів / [К. Смолій, І. Романишин, Я. Казак, та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2011. – №2(22). – С.80-81.
139. Сучасні проблеми гідротехнічних споруд в Україні / О. І. Бондар, Л. Є. Михайленко, В. М. Ващенко, Ю. С. Лапшин. // Вісник НАН України. – 2014. – №2. – С. 40–47.

140. ТИТАН Автоматическая система контроля состояния сооружений | Банкомсвязь [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.bkc.com.ua/ru/product/1>.
141. Тревого І. Метрологічна атестація еталонного базиса технологією ГНСС / І. Тревого, І. Цюпак // Метрологія. – Харків. – 2014. – С. 381–384.
142. Третяк К. Дослідження ефективності урівноваження ГНСС мереж / К.Р. Третяк, К.Б. Смолій, О.В. Серант // Інженерна геодезія. – Київ. – 2015. – Вип. 62. – С. 32-44.
143. Третяк К. Оцінка точності параметрів деформацій напірних трубопроводів / К. Третяк, К. Смолій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», – 2012. – Вип. 1(23). – С. 115-119.
144. Третяк К. Урівноваження диференційним методом ГНСС мереж з обмеженим доступом до супутникових сигналів / К.Р. Третяк, К.Б. Смолій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів. – 2015. – Вип. 81. – С.25-45.
145. Тяпкин К. Физика Земли / К. Тяпкин. – Киев: Выща школа, 1998. – 312 с.
146. Убайдуллаева М. Вопросы вычислительной и прикладной математики / М. Убайдуллаева. – Ташкент. – 1978. – № 53. – С. 44-54.
147. Уолтхем Т. Катастрофа: неистовая Земля / Т. Уолтхем. – Львів: Недра, 1982. – 223 с.
148. Ушаков С. Дрейф материков и климаты Земли / С. Ушаков, Н. Ясаманов. – Москва: Недра, 1984. – 206 с.
149. Форум ГЕОДЕЗИСТ [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://geodesist.ru/forum/topic.php?forum=1&topic=334>.
150. Хаимов З. Дисперсионный анализ невязок треугольников / З. Хаимов. // Изв. высш. учебн. заведений геод. и аэрофотосъемка. – 1964. – №6.
151. Хаин В. Геотектоника с основами геодинамики / В. Хаин, М. Ломизе / Изд. Московского университета, 1995. – 476 с.
152. Хижняк М. Здоров'я людини та екологія / М. Хижняк, Л. Нагорна. – Київ: Здоров'я, 1995. – 232 с.

153. Яценко А. От водяного уровня до высокоточного инклинометра / А. Яценко // Геопрофи. – 2010. – №4. – С. 17-19.