

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

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

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: – доктор технічних наук, професор
Третяк Корнелій Романович,
директор Інституту геодезії
Національного університету «Львівська політехніка»,
м. Львів;

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Войтенко Степан Петрович,
завідувач кафедри інженерної геодезії
Київського національного університету будівництва та
архітектури, м. Київ;

кандидат технічних наук,
Ільків Євген Юрійович,
доцент кафедри землевпорядкування та кадастру
Івано-Франківського національного технічного університету
нафти і газу, м. Івано-Франківськ.

Захист дисертації відбудеться « » 2017 р. о годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12, ауд. 502 П навч. корп.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий « » 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

к.т.н., доцент Паляниця Б. Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Гідроенергетика займає друге місце з виробітку електроенергії у світі. Однак особливості місця розташування, ендегенні, екзогенні та техногенні фактори і експлуатації об'єктів ГЕС зумовлюють деформаційні процеси у всіх інженерних вузлах та спорудах. 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, тріангуляція і трилатерація. На сьогоднішній день у світі широко застосовують автоматизовані системи спостережень, що включають в 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 високочастотними, але за рахунок оперативності отримання високоточних результатів зменшується ймовірність аварійних ситуацій та економляться 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, атмосферною затримкою, рефракцією, тощо. Інструментально підвищувати точність вимірів проблематично, тому необхідно підвищувати точність математичного опрацювання результатів вимірів, їх надійність та усувати вплив похибок вимірювань. Враховуючи вищезазначене, актуальною задачею є розробка методів 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 Тербле-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 задачі досліджень. Основною метою роботи є теоретично-експериментальне обґрунтування та розробка методики максимального вилучення систематичних похибок геодезичних вимірів для підвищення точності та достовірності визначення зміщень та деформацій гідротехнічних споруд.

У рамках дисертаційної роботи поставлено такі основні завдання:

- 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 розробити методику апріорної та апостеріорної оцінки точності параметрів деформацій окремих елементів ГЕС, зокрема напірного трубопроводу, як одного з найнебезпечніших вузлів Тербле-Ріцької 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 дослідження є деформації інженерних споруд, зокрема напірних трубопроводів гідроелектростанцій.

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

Наукова новизна одержаних результатів.

На основі математичного моделювання розроблено та запропоновано новий метод врівноваження інженерно-геодезичних мереж, особливостями 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;
- методика розрахунку оцінки 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 дисертаційної роботи, отримані автором, опубліковані у співавторстві у працях [1, 2, 4, 5, 6, 8] та одноосібно [3, 7]. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [6] – експериментальне дослідження параметрів деформацій напірного трубопроводу, [2] – формули для визначення оцінки точності параметрів деформацій напірних трубопроводів; розрахунок точності параметрів деформацій напірного трубопроводу Теремле-Ріцької ГЕС, [8] – апробація методики комплексного дослідження деформацій аварійної споруди, [5] – порівняльний аналіз ефективності модифікованого параметричного методу врівноваження на мережах з різною відкритістю горизонту, [4] – апробація ефективності модифікованого параметричного методу врівноваження у мережах з ідеальними умовами видимості супутників, [1] – 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 таких наукових зібраннях:

- Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні напрямки наукових досліджень у сфері геодезії та картографії», 8-10 грудня 2010 р. Кутно, Польща.
- XV Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології». вересень 2010 р. Алушта, Крим.
- XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2011». квітень 2011 р. Львів-Яворів.
- XVI Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології». вересень 2011 р. Алушта, Крим.

- XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2012». квітень 2012 р. Львів-Яворів.
- XVII Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології». вересень 2012 р. Алушта, Крим.
- XVIII Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології». вересень 2013 р. Алушта, Крим.
- XX Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2015». 22-24 квітня 2015 р. Львів-Яворів-Брюховичі.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 11 наукових праць [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,]. З них 1 стаття у науковому періодичному виданні України, що входить до міжнародних наукометричних баз [1], 4 статті у фахових виданнях з переліку ВАК України [2, 3, 4, 5], 3 статті у збірниках тез наукових конференцій [6, 7, 8].

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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та її основні завдання, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, сформульовано основні положення, які виносяться на захист, викладено відомості про апробацію роботи, повноту публікацій результатів та їх впровадження.

У першому розділі дисертаційної роботи «**Аналіз методів визначення деформацій інженерних споруд ГЕС**» проведено аналіз найбільших аварій, які відбулися на ГЕС, причин їх виникнення та екологічних наслідків. Обґрунтовано необхідність виконання геодезичного моніторингу за станом інженерних споруд ГЕС.

Виконано огляд основних причин виникнення деформацій інженерних споруд, та встановлено, що основними причинами їх виникнення є техногенні процеси та антропогенні фактори.

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 виконується контроль достовірності отриманих результатів та досягається максимальна точність.

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

Виконано аналіз 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.

Встановлено, що застосування класичних методів опрацювання геодезичних вимірів в системах автоматизованого моніторингу деформацій інженерних споруд не є ефективними і вимагає розробки нових методів опрацювання корельованих між собою результатів вимірів в режимі реального часу з врахуванням систематичних похибок, які є основною перешкодою підвищення точності отриманих результатів.

Другий розділ дисертаційної роботи «**Визначення деформацій напірних трубопроводів ГЕС геодезичними методами**» присвячений розробленню, теоретичному та статистичному обґрунтуванню модифікованого параметричного методу врівноваження інженерно-геодезичних мереж ГЕС.

На основі аналізу літературних джерел визначено, що незважаючи на ефективні методи усунування систематичних похибок в 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 опрацьовувати тільки випадкові похибки. Тому необхідно розробити такий метод врівноваження, який дозволив би усунути також систематичні похибки.

З метою зменшення впливу систематичних похибок у роботі пропонується модифікований параметричний метод врівноваження геодезичних мереж. Розроблений метод дозволяє частково усунути систематичні похибки на етапі врівноваження мережі. Запропонований метод врівноваження є модифікацією класичного параметричного методу врівноваження. Для часткового вилучення систематичних похибок запропоновано замість рівнянь поправок усіх векторів складати рівняння поправок різниць цих векторів.

Рівняння поправок проекцій вектора на координатні осі в ГНСС-мережах є наступні:

$$\begin{aligned} -\delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \delta x_j \frac{\partial f}{\partial x_j} + l_{x_{ij}} &= v_{x_{ij}}, \\ -\delta y_i \frac{\partial f}{\partial y_i} + \delta y_j \frac{\partial f}{\partial y_j} + l_{y_{ij}} &= v_{y_{ij}}, \\ -\delta h_i \frac{\partial f}{\partial h_i} + \delta h_j \frac{\partial f}{\partial h_j} + l_{h_{ij}} &= v_{h_{ij}}. \end{aligned} \quad (1)$$

При застосуванні класичного методу врівноваження для трикутника утвореного трьома одночасно виміряними векторами, складають дев'ять рівнянь (1). Основним недоліком коваріаційної матриці, що отримується при рішенні окремих ГНСС-векторів є те, що вона характеризує точність визначення ГНСС-векторів по внутрішній збіжності. В ній не враховується вплив похибок за центрування, виміру висоти антени, багатопляховість, похибки положення фазових центрів антен, некорельовані похибки за тропосферну та іоносферну затримки і інші. Для модифікованого параметричного методу рівняння поправок будуть двох типів, а саме рівняння поправок вимірюваних векторів (1) і рівняння поправок різниць

векторів. У цьому ж трикутнику два вектори утворюють рівняння їх різниць (2) і один вектор залишається у вигляді рівняння поправок (1).

$$\begin{aligned} -\delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \delta x_m \frac{\partial f}{\partial x_m} + \begin{pmatrix} l_{x_{ij}} & -l_{x_{mj}} \end{pmatrix} &= v_{x_{ijmj}}, \\ -\delta y_i \frac{\partial f}{\partial y_i} + \delta y_m \frac{\partial f}{\partial y_m} + \begin{pmatrix} l_{y_{ij}} & -l_{y_{mj}} \end{pmatrix} &= v_{y_{ijmj}}, \\ -\delta h_i \frac{\partial f}{\partial h_i} + \delta h_m \frac{\partial f}{\partial h_m} + \begin{pmatrix} l_{h_{ij}} & -l_{h_{mj}} \end{pmatrix} &= v_{z_{ijmj}}, \end{aligned} \quad (2),$$

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. Слід зауважити, що для класичного параметричного методу врівноваження для ГНСС-трикутника утворюються 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 в собі ряд похибок, тому в роботі отримані формули для таких вимірів.

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 апроксимаційні залежності 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 в мережі та її жорсткості ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження порівняно з класичним параметричним зростає (рівняння 3).

$$E = (0,285 \pm 0,063) + \frac{(0,749 \pm 0,097)}{((0,391 \pm 0,068) \cdot q + (0,109 \pm 0,026))} \quad (3),$$

де E – коефіцієнт ефективності, q – коефіцієнт жорсткості мережі.

Також у другому розділі вперше виведено формули для розрахунку оцінки точності визначення параметрів деформацій прогонів напірного трубопроводу ГЕС залежно від точності геодезичних вимірів, та апробовано їх на дериваційному трубопроводі Теремле-Ріцької ГЕС.

Для прикладу представимо спрощену формулу (4) для оцінки точності дилатації:

$$M_{\Delta} = \sqrt{\frac{(m_{u_1}^2 + m_{u_2}^2) \cos^2 \alpha + (m_{v_1}^2 + m_{v_2}^2) \cos^2 \phi + (m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2) \cos^2 \beta}{L^2}} \quad (4),$$

де m_u, m_t, m_v – точність визначення проекцій опор напірного трубопроводу, α, β, ϕ – величини кутів направляючих косинусів, L – довжини прогонів.

Отримані формули для визначення оцінки точності параметрів деформацій напірних трубопроводів можна використовувати для будь-яких ГЕС такого типу.

У третьому розділі дисертаційної роботи **«Експериментальні дослідження ефективності застосування модифікованого параметричного методу для врівноваження мереж»** виконані експериментальні дослідження ефективності запропонованого модифікованого параметричного методу врівноваження інженерно-геодезичних мереж ГЕС в порівнянні з класичним параметричним методом.

З цією метою може було перевірено ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження ГНСС-вимірів для мереж, які мають задовільні умови відкритості горизонту (кут відсічки супутників становив 10^0 , і тривалість спостережень обмежена 12-ма годинами). Для цього було вибрано мережу, що складається з 8-ми перманентних станцій, які розташовані на південному заході США. На кожному пункті мережі встановлені двочастотні ГНСС-приймачі, та частота спостережень становить 15 секунд. 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), а також значення точних ефемерид. Схема вимірів для мережі створювалась з комбінації усіх можливих трикутників, утворених трьома одночасно виміряними векторами. Виміри векторів кожного трикутника проводились в іншу добу, таким чином період вимірів складав 56 днів.

Особливістю порівняння результатів врівноваження мережі є те, що обчислення векторів виконувалося двічі: один раз в програмному пакеті LGO, другий – в 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.

Врівноваження виконувалося 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 похибки визначення координат пунктів за результатами врівноваження. Тому далі ці різниці будемо називати помилками визначених координат відповідним методом врівноваження. Результати визначення похибок координат пунктів δ_x , δ_y , δ_h для мережі (вектори обчислені в програмному пакеті LGO) двома методами врівноваження представлено в таблиці 1. В передостанньому рядку таблиці приведена сума, а в останньому рядку середнє значення відповідних похибок. У колонках 8 і 9 приведено похибки кожного з пунктів в плані, а у колонках 10 і 11 в просторі.

Результати опрацювання мережі (вектори обчислені в програмному пакеті LGO) представлені у таблиці 1. З таблиці 1 видно, що похибки визначених координат модифікованим параметричним методом є значно меншими ніж похибки у координатах, визначених класичним методом для осей x і y , окрім пункту 3 для осі x , а по осі h вони майже рівні. У загальному відзначимо, що похибки, отримані модифікованим параметричним методом, є меншими ніж похибки, визначені з врівноваження класичним параметричним методом. Ефективність запропонованого методу становить 15% в плані і 4% в просторі.

Таблиця 1

Похибки 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
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

Аналогічне опрацювання мережі двома методами виконувалося для векторів обчислених в програмному пакеті ТВС. В таблиці 2 та на рисунку 1 приведено зведені результати визначення середніх похибок з опрацювання мереж модифікованим параметричним і класичним методами, а в таблиці 3 середньоквадратичні похибки за результатами врівноваження. В підсумку середні похибки визначення координат пунктів для мережі 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.

Таблиця 2

**Середні похибки 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

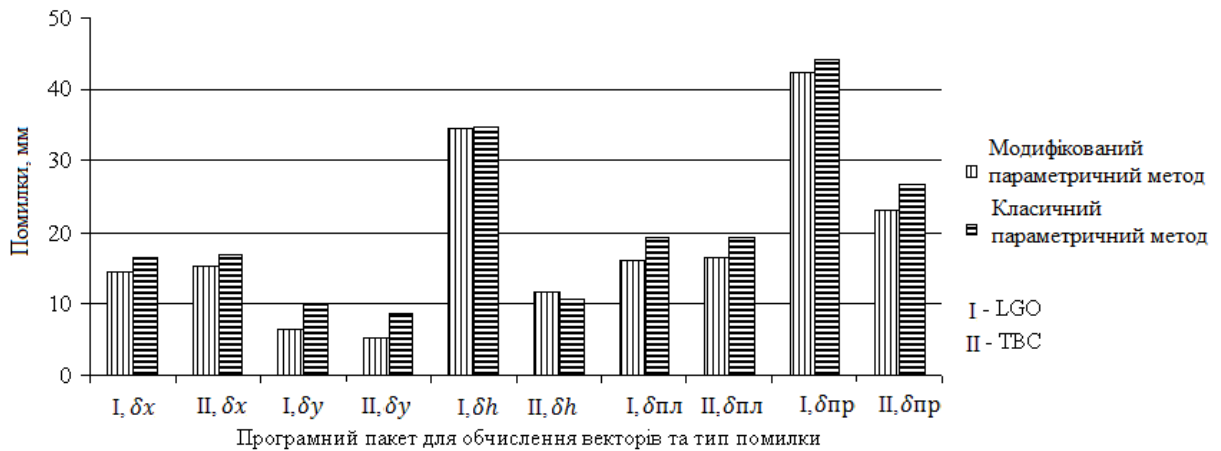


Рис. 1 Середні похибки координат визначених модифікованим параметричним та класичним параметричним методами за результатами опрацювання мереж

Таблиця 3

**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

Враховуючи те, що більшість ГЕС розташовані на територіях зі складним рельєфом, виконано дослідження ефективності модифікованого параметричного методу в складних умовах доступу до супутникових сигналів. Для проведення таких досліджень було вибрано три мережі перманентних станцій, які склалися з 6-ти, 8-ми та 10-ти станцій. Обчислення векторів проводилось 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° , тривалість спостережень була обмежена 4-ма годинами. Для обчислення векторів обчислювались поправки за тропосферну затримку згідно моделі Хопфілд, та іоносферна затримка визначалась з двох частот L_1 та L_2 .

Після обчислення векторів було складено рівняння поправок для вимірних векторів для класичного методу врівноваження (1) та модифікованого параметричного методу (1, 2).

Результати визначення похибок координат пунктів δ_x , δ_y , δ_h для мережі I двома методами врівноваження представлено в таблиці 4.

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

Таблиця 4

**Похибки визначених координат пунктів мережі I
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
$ \text{серед} $	5,8	10,8	3,0	2,8	19,2	31,5	6,5	11,5	22,1	33,9

Результати опрацювання мережі II представлені у таблиці 5. З таблиці 5 видно, що для мережі II похибки визначених координат модифікованим параметричним методом є значно менші ніж похибки у координатах, визначених класичним методом, окрім пункту 7 для осі y та пунктів 3 і 7 для осі h . Сумарні похибки мережі II є в 4 рази меншими по осям x та y і в 1,5 рази по осі h . Порівнявши

похибки визначених координат пунктів двома методами в плані і просторі, можна стверджувати, що модифікований параметричний метод врівноваження дає на 73% кращий результат в плані і на 53% в 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 похибки.

Таблиця 5

**Похибки 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

Аналогічна ситуація спостерігається за результатами врівноваження та похибками вимірів для мережі III (табл. 6). Похибки 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 таблиці 7 видно, що похибки 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 похибки 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%. Слід зазначити, що похибки, отримані модифікованим параметричним методом, є менші ніж похибки визначені з врівноваження класичним параметричним методом, та ефективність його становить 12% в плані і 26% в просторі.

**Похибки 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
серед	4,9	5,6	6,3	6,7	21,8	31,8	8,6	9,8	25,3	34,3

Узагальнюючи результати опрацювання усіх трьох мереж, необхідно зазначити, що середньоквадратичні похибки, визначені класичним методом, в середньому на 60% є меншими ніж визначені похибки 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.

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

Для підтвердження ефективності опрацювання інженерно-геодезичних мереж модифікованим параметричним методом врівноваження, виконано 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 (див. рис. 2).

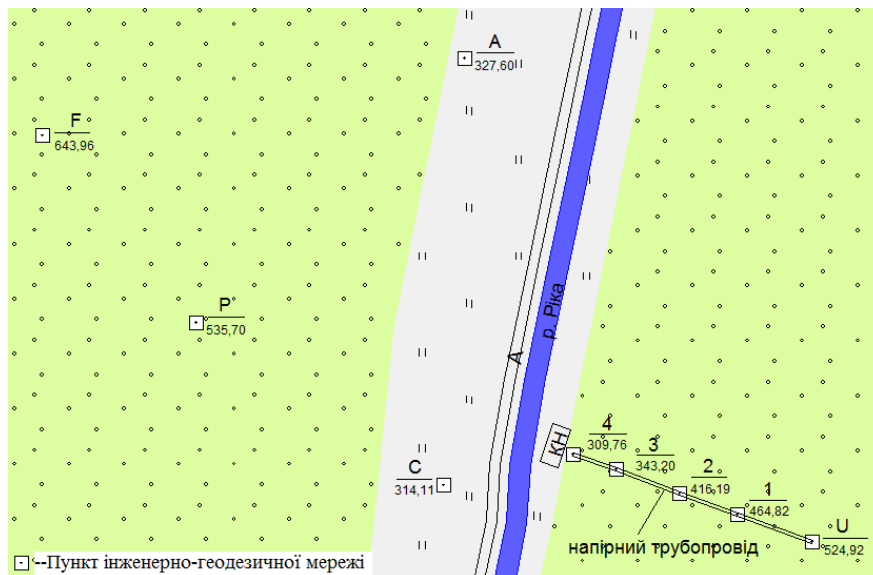


Рис. 2 Схема інженерно-геодезичної мережі Теребле-Ріцької ГЕС

Дослідження полягало у виконанні одночасних вимірів двома високоточними тахеометрами з двох вершин трикутника на третю де розташовувалась призма. Лінію між тахеометрами названо базисною. Для спостережень було вибрано 28 базисів, з яких виконувалися спостереження на інші пункти мережі. Враховуючи особливості розташування гідроелектростанції, неможливо 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 Теребле-Ріцької ГЕС виконано лінійно-кутові виміри для 77 трикутників спостережень, що утворені двома тахеометрами та призмами.

Лінійно-кутові виміри виконувалися високоточними роботизованими електронними тахеометрами TPS-1201 та TCA-2003 швейцарської фірми Leica Geosystems. Для врахування поправок за атмосферу та рефракцію виконувалися заміри тиску та температури на всіх пунктах мережі впродовж всіх днів спостережень.

По завершенні 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. Під час виконання врівноваження лінії між пунктами А, С, Р, F вважалися сталими, а лінії в трикутниках 1, 2, 8, 28, позбавлені спотворень. Після виконання врівноваження двома методами ми отримали поправки у виміряні величини ліній (див. рис. 3).

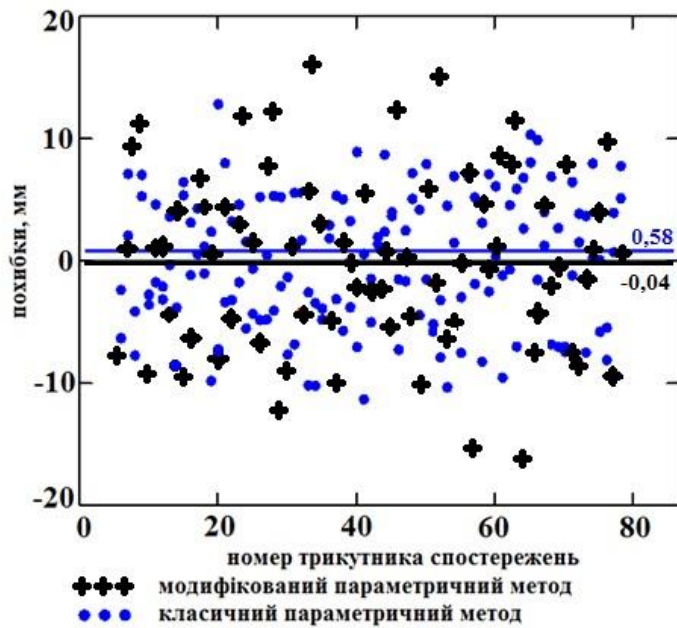


Рис. 3 Розподіл поправок у вимірних лініях після врівноваження мережі модифікованим параметричним та класичним параметричним методами

З рис. 3 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: γ_x , γ_y , γ_z - відносні зміщення по осях X , Y , Z , γ - загальне зміщення та Δ - дилатація (стиску або розтягу) за формулами виведеним в розділі 2. Аналізуючи отримані результати, необхідно відмітити, що розподіл відносних зміщень параметрів компонентів деформацій, отриманих на основі результатів врівноваження мережі модифікованим параметричним методом, дає більш згладжений результат, а розподіл відносних зміщень дає менші величини відповідних зміщень, що вказує на часткове усунення систематичних похибок з результатів вимірів, які приводять до завищення результатів. Значення компонент деформацій є безрозмірними величинами та точність визначення параметрів деформацій становить 10^{-4} .

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено наукове завдання – розроблення модифікованого параметричного методу врівноваження інженерно-геодезичних мереж ГЕС та перевірено його 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. В результаті виконаних досліджень сформулюємо такі 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 ефективність модифікованого параметричного методу при наявності систематичних похибок, 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. За результатами експериментальних досліджень на Теремле-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 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) похибки визначення координат пунктів при опрацюванні модифікованим параметричним методом є на 10÷50% менші ніж класичним параметричним.
5. На основі апріорного розрахунку точності ГНСС мереж, виконаного модифікованим параметричним та класичним параметричним методом врівноваження, встановлено, що похибки, визначені класичним параметричним методом, є на 60% меншими ніж реальні похибки, а для модифікованого параметричного методу вони відрізняються в 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- **Стаття в науковому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз:**

1. Смолій 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.

• **Публікації у наукових фахових виданнях України:**

2. Смолій 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. Смолій К. Дослідження ефективності урівноваження ГНСС мереж / К.Р. Третяк, К.Б. Смолій, О.В. Серант // Інженерна геодезія. – Київ. – 2015. – С. 32-44.

5. Smoliy 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.

• **Публікації у збірниках матеріалів конференцій:**

6. Смолій К. Дослідження деформацій напірних трубопроводів / К.Б. Смолій, К.Р. Третяк // Зб. матеріалів XVI Міжнародного науково-технічного симпозиуму “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: ГНСС і GIS-технології”. – Алушта (Крим). – 2011. – С. 64-67.

7. Смолій К. Дослідження зміщення напірного трубопроводу Терезько-Рікської ГЕС на основі одночасних спостережень високоточними тахеометрами / К.Б. Смолій // Зб. матеріалів XVII Міжнародного науково-технічного симпозиуму “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: ГНСС і GIS-технології”. – Алушта (Крим). – 2012. – С. 269-270.

8. 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: ГНСС і GIS-технології”. – Алушта (Крим). – 2010. – С. 260-262.

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». Львів, 2017.

Дисертація містить теоретично-експериментальне обґрунтування методики опрацювання інженерно-геодезичних мереж, що використовують при дослідженні 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 в системах автоматизованого моніторингу деформацій інженерних споруд не є ефективними, і тому нами розроблений 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. Встановлено 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 із збільшенням кількості пунктів в мережі та її жорсткості ефективність модифікованого параметричного методу врівноваження порівняно з класичним параметричним зростає.

Виведено 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 експериментальних 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) похибки 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 похибки, 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.

АННОТАЦІЯ

Смелый К.Б. Теоретико-экспериментальное обоснование методики обработки геодезических сетей для определения смещений и деформаций гидротехнических сооружений.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 «Геодезия, фотограмметрия и картография». - Национальный университет «Львовская политехника». Львов, 2017.

Диссертация содержит теоретико-экспериментальное обоснование методики обработки инженерно-геодезических сетей, использующих при исследовании смещений и деформаций инженерных сооружений ГЭС. Выполнено описание причин и факторов, которые обуславливают деформационные процессы в инженерных сооружениях. На основе анализа деформационных процессов установлено, что комплексные методы их мониторинга являются наиболее эффективными и дают максимальную точность результатов.

Выполнен обзор существующих методов уменьшения влияния систематических погрешностей на результаты обработки результатов измерений деформаций и установлено, что существующие методы являются громоздкими, математически сложными и не позволяют точно устранить систематические погрешности из результатов одновременных наблюдений. Установлено, что применение классических методов обработки геодезических измерений в системах автоматизированного мониторинга деформаций инженерных сооружений не эффективны, и поэтому нами разработан модифицированный параметрический метод обработки коррелированных между собой результатов измерений в режиме реального времени с учетом систематических погрешностей. Получено теоретическое обоснование метода и уравнения поправок для ГНСС, линейно-угловых измерений и тригонометрического нивелирования.

На основе метода статистических испытаний доказано преимущества модифицированного параметрического метода по сравнению с классическим параметрическим методом обработки инженерно-геодезических сетей в зависимости от жесткости сетей, размеров систематических и случайных погрешностей, количества пунктов и конфигураций сетей. Установлено формулы для расчета эффективности модифицированного параметрического метода по сравнению с классическим параметрическим методом в зависимости от количества пунктов, жесткости и размеров сетей, размеров систематических и случайных погрешностей. Установлено, что с увеличением количества пунктов в сети и ее жесткости эффективность модифицированного параметрического метода уравнивания по сравнению с классическим параметрическим растет.

Выведены формулы для оценки точности определения деформационных параметров прогонов напорных трубопроводов ГЭС в зависимости от точности

геодезических измерений и апробирована их на деривационном трубопроводе Тербле-Рицкой ГЭС. На основе экспериментальных исследований установлено, что точность определения деформаций на порядок выше, чем величины самых деформаций.

По результатам обработки реальных ГНСС-сетей доказана эффективность использования модифицированного параметрического метода по сравнению с классическим параметрическим методом. Точность достигает $10 \div 20\%$ для сетей с идеальными условиями видимости спутников и удовлетворительной продолжительностью наблюдений, а для сетей с экстремальными условиями (частично ограниченная видимость спутников и заниженная продолжительность измерений векторов) ошибки определения координат пунктов при обработке модифицированным параметрическим методом является на $10 \div 50\%$ меньше, чем классическим параметрическим, что подтверждает эффективность применения модифицированного параметрического метода.

На основе априорного расчета точности ГНСС-сетей, выполненного модифицированным параметрическим и классическим параметрическими методами уравнивания, установлено, что погрешности, определенные классическим параметрическим методом, является на 60% меньше, чем реальные ошибки, а для модифицированного параметрического метода они отличаются в пределах 20% , что указывает на значительно большую достоверность априорной оценки точности модифицированного параметрического метода и позволяет его рекомендовать для уравнивания инженерно-геодезических сетей, особенно на гидротехнических сооружениях со сложным рельефом и ограниченными условиями видимости спутников.

Ключевые слова: деформация инженерных сооружений, методика обработки геодезических сетей, модифицированный параметрический метод уравнивания, геодезический мониторинг ГЭС, систематические погрешности.

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.

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