

К. Р. ТРЕТЯК, *д-р техн. наук, професор*
кафедри вищої геодезії та астрономії,
К. Б. СМОЛІЙ, *асист. кафедри*
фотограмметрії та геоінформатики,
О.В. СЕРАНТ, *асист. кафедри геодезії,*
Національний університет "Львівська політехніка"

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УРІВНОВАЖЕННЯ ГНСС-МЕРЕЖ

З метою максимального вилучення систематичних похибок на етапі опрацювання ГНСС-мереж, створених на основі декількох сесій спостережень, розроблено диференційний метод їх урівноваження. За диференційним методом пропонується частково замінити рівняння поправок вимірних векторів на рівняння поправок різниць цих векторів. Виконано порівняння результатів урівноваження двох мереж з ідеальними умовами видимості і з обмеженим доступом до супутників. Ефективність диференційного методу врівноваження ГНСС-вимірів порівняно з класичним параметричним становить 10-50%.

Ключові слова: *похибки ГНСС-вимірів, диференційний метод урівноваження, параметричний метод урівноваження.*

Постановка проблеми. Нині ГНСС-спостереження широко використовують у процесі моніторингу за деформаціями інженерних споруд ГЕС. Такі дослідження потребують високої точності отриманих результатів, а для цього слід максимально зменшити вплив випадкових та систематичних похибок. Відомо чимало методів та способів усунення систематичних похибок з ГНСС-вимірів, але незважаючи на це, вплив похибок залишається суттєвим та значною мірою позначається на результатах опрацювання ГНСС-вимірювань. Для зменшення систематичних похибок нами розроблено диференційний метод урівноваження ГНСС-мереж, уже досліджений для мереж з імітацією складних умов доступу до супутникових сигналів [4]. Вважаємо за доцільне дослідити його ефективність для урівноваження ГНСС-мереж, які мають задовільні умови.

Мета роботи – виконати врівноваження ГНСС-мереж за запропонованими диференційним та класичним параметричним методами та дослідити його ефективність порівняно з класичним параметричним методом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній геодезії метод ГНСС-спостережень широко застосовують у різноманітних дослідженнях. Однією із сфер застосування цього методу є моніторинг деформацій інженерних споруд, особливо об'єктів ГЕС [1; 3], тому важливим є отримання результатів високої точності. Для підвищення точності результатів ГНСС-спостережень потрібно зменшити вплив систематичних похибок, які виникають під час одночасних вимірювань, адже ці похибки становлять 2 мм для ліній довжиною близько 20 км [2]. Застосовують багато методів та способів зменшити вплив саме систематичних похибок на результати ГНСС-спостережень [5; 6; 7], але їх громіздкі та трудомісткі алгоритми

спрямовані переважно на усунення однієї зі складових цієї похибки, що не завжди дає змогу отримати бажаний результат.

Виклад основного матеріалу. Нині відомо чимало методів та способів усунення систематичних похибок з ГНСС-вимірів, але, незважаючи на це, вплив похибок залишається суттєвим, що значною мірою позначається на результатах опрацювання ГНСС-вимірів. Для зменшення впливу систематичних похибок нами розроблено диференційний метод урівноваження ГНСС-мереж, який є модифікацією класичного параметричного методу [4]. Особливістю запропонованого методу є те, що для трикутника з одночасно виміряними векторами замість рівнянь поправок усіх векторів потрібно складати рівняння поправок різниць векторів, при цьому утворені рівняння різниць не повинні мати спільних векторів. Для векторів, які не ввійшли в рівняння різниць векторів, записують класичні рівняння поправок. Отже, у диференційному методі можуть бути застосовані два типи рівнянь – рівняння поправок векторів (1) і їх різниць (2):

$$\begin{aligned} \delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \delta x_j \frac{\partial f}{\partial x_j} + l_{x_{ij}} &= v_{x_{ij}} ; \\ \delta y_i \frac{\partial f}{\partial y_i} + \delta y_j \frac{\partial f}{\partial y_j} + l_{y_{ij}} &= v_{y_{ij}} ; \\ \delta z_i \frac{\partial f}{\partial z_i} + \delta z_j \frac{\partial f}{\partial z_j} + l_{z_{ij}} &= v_{z_{ij}} , \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} - \delta x_m \frac{\partial f}{\partial x_m} + \left(l_{x_{ij}} - l_{x_{mj}} \right) &= v_{x_{im}} ; \\ \delta y_i \frac{\partial f}{\partial y_i} - \delta y_m \frac{\partial f}{\partial y_m} + \left(l_{y_{ij}} - l_{y_{mj}} \right) &= v_{y_{im}} ; \\ \delta z_i \frac{\partial f}{\partial z_i} - \delta z_m \frac{\partial f}{\partial z_m} + \left(l_{z_{ij}} - l_{z_{mj}} \right) &= v_{z_{im}} , \end{aligned} \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} l_{x_{ij}} &= \Delta x_{ij_{вим}} - \Delta x_{ij_{набл}} ; \\ l_{x_{mj}} &= \Delta x_{mj_{вим}} - \Delta x_{mj_{набл}} ; \\ l_{y_{ij}} &= \Delta y_{ij_{вим}} - \Delta y_{ij_{набл}} ; \\ l_{y_{mj}} &= \Delta y_{mj_{вим}} - \Delta y_{mj_{набл}} ; \\ l_{z_{ij}} &= \Delta z_{ij_{вим}} - \Delta z_{ij_{набл}} ; \\ l_{z_{mj}} &= \Delta z_{mj_{вим}} - \Delta z_{mj_{набл}} ; \end{aligned} \quad (3)$$

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

Застосовуючи класичний метод урівноваження для трикутника, утвореного трьома одночасно вимірними векторами, складають дев'ять рівнянь. Відповідно за диференціальним методом, на відмінну від класичного параметричного методу, кількість рівнянь поправок для кожного трикутника буде на одне менше, що погіршує стійкість розв'язку та негативно позначається на оцінці точності врівноваженої мережі, але дає можливість вилучити систематичні похибки. Подальше урівноваження мережі за диференціальним методом виконують за способом найменших квадратів.

Для доведення більшої ефективності диференціального методу урівноваження мереж порівняно з класичним параметричним методом нами вже виконано дослідження на трьох мережах з імітацією складних умов доступу до супутникових сигналів (кут відсічки супутників становив 20° , тривалість спостережень обмежена чотирма годинами) [4]. Мережі склалися з 6, 8 та 10 станцій, на яких розміщено двочастотні ГНСС-приймачі. Частота спостережень становила 15 секунд, максимальна відстань між станціями – 76 км. Під час досліджень виявлено, що середні та максимальні похибки визначення координат пунктів загалом на 10-50% менші за результатами диференціального методу урівноваження порівняно з класичним параметричним методом урівноваження, що підтверджує переваги диференціального методу з усунення систематичних похибок вимірів. Узагальнюючи результати опрацювання усіх трьох мереж, варто також зазначити, що середньоквадратичні похибки координат пунктів, визначені за класичним параметричним методом, в середньому на 60% менші, ніж помилки, визначені за тим самим методом, а для диференціального методу вони менші в середньому на 20%, що також підтверджує вищу достовірність результатів, отриманих за диференціальним методом.

Зважаючи на викладене, доцільним є дослідити ефективність диференціального методу врівноваження ГНСС-вимірів для мереж, які мають задовільні умови відкритості горизонту (кут відсічки супутників становив 10° , тривалість спостережень обмежена 12 годинами). Для цього нами була вибрана мережа, що складається з восьми перманентних станцій (рис. 1), розміщених на південному заході США (південна Каліфорнія) поблизу узбережжя Тихого океану.

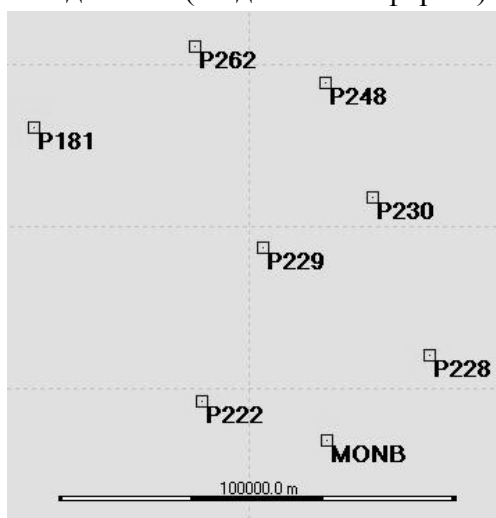


Рис. 1. Схема мережі ГНСС станцій

На кожному пункті мережі встановлено двочастотні ГНСС-приймачі, частота спостережень – 15 секунд. Мережа складається зі станцій p181, MONB, p222, p228, p229, p230, p248, p262. Вхідними даними для обчислення векторів і врівноваження мереж були RINEX-файли результатів ГНСС-вимірів на цих станціях, розміщених у вільному доступі на сайті Scripps Orbit and Permanent Array Center [8], а також значення точних ефемерид.

Схему вимірів для мережі складено з комбінації усіх можливих трикутників, утворених трьома одночасно вимірними векторами. Вимірювали вектори кожного трикутника щоразу в іншу добу, таким чином, період вимірювання становив 56 днів. Календарний графік вимірювань представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Календарний графік вимірювань для I і II мереж

| № дня | Дата спостережень | Станції | № дня | Дата спостережень | Станції | № дня | Дата спостережень | Станції | № дня | Дата спостережень | Станції |
|-------|-------------------|------------------------|-------|-------------------|------------------------|-------|-------------------|------------------------|-------|-------------------|------------------------|
| 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 |
| 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 урівноваження мережі є те, що обчислення векторів було виконане двічі: один раз – в програмному пакеті LGO (Leica Geo Office), другий – в програмному пакеті TBC (Trimble Business Centre). Для визначення точності координат пунктів та встановлення переваг і недоліків, отриманих за результатами обох методів, потрібно мати достовірні, «істинні» координати пунктів. За істинні координати пунктів взято урівноважені координати, визначені на підставі опрацювання тривалих рядів спостережень з центру SOPAC, редуковані на середню епоху вимірювань [8].

Урівноваження виконано за диференційним та класичним параметричним методами. За координати першого пункту мережі взято координати, визначені центром SOPAC, координати решти пунктів отримано за результатами урівноваження. На основі отриманих координат з урівноважених мереж визначено їх різниці з координатами відповідних пунктів. Ці різниці визначені для класичного параметричного та диференційного методів і трансформовані на площину універсальної проєкції Меркатора. Різниці, визначені відносно координат центру SOPAC, можна інтерпретувати як помилки визначення координат пунктів за результатами урівноваження, тому далі ці різниці називаємо помилками визначених координат за відповідним методом урівноваження. Результати визначення помилок координат пунктів δx , δy , δh для мережі (вектори обчислено в програмному пакеті LGO) за двома методами урівноваження представлено в табл. 2. В передостанньому рядку таблиці наведено суму, а в останньому рядку – середнє значення відповідних помилок. У колонках 8 і 9 зазначено помилки кожного з пунктів у плані, а у колонках 10 і 11 – в просторі. В табл. 2 представлена апостеріорна оцінка точності визначених координат пунктів за результатами урівноваження диференційним та класичним параметричним методами. В останньому рядку наведено середні квадратичні похибки визначення координат пунктів.

Результати опрацювання мережі (вектори обчислені в програмному пакеті LGO) представлені у табл. 2 та 3 і на рис. 2. З рисунків 2, а; 2, б та 2, в і табл. 2 видно, що помилки у визначених за диференційним методом координат є значно меншими, ніж помилки у координатах, визначених за класичним методом для осей x і y , за винятком п. 3 для осі x , а на осі h вони приблизно однакові. Зміну помилок у визначенні координат в плані і просторі зображено на рис. 2, з і 2, д. Слід зазначити, що помилки, отримані за диференційним методом, є меншими, ніж помилки, визначені з урівноваження за класичним параметричним методом. Ефективність запропонованого методу становить 15% в плані і 4% – в просторі.

Таблиця 2

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

| № пункту | δx диф, мм | δx клас, мм | δy диф, мм | δy клас, мм | δh диф, мм | δh клас, мм | δ план диф, мм | δ план клас, мм | δ прос диф, мм | δ прос клас, мм |
|----------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 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 |

| № пункту | δx диф, мм | δx клас, мм | δy диф, мм | δy клас, мм | δh диф, мм | δh клас, мм | δ план диф, мм | δ план клас, мм | δ прос диф, мм | δ прос клас, мм |
|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 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 |

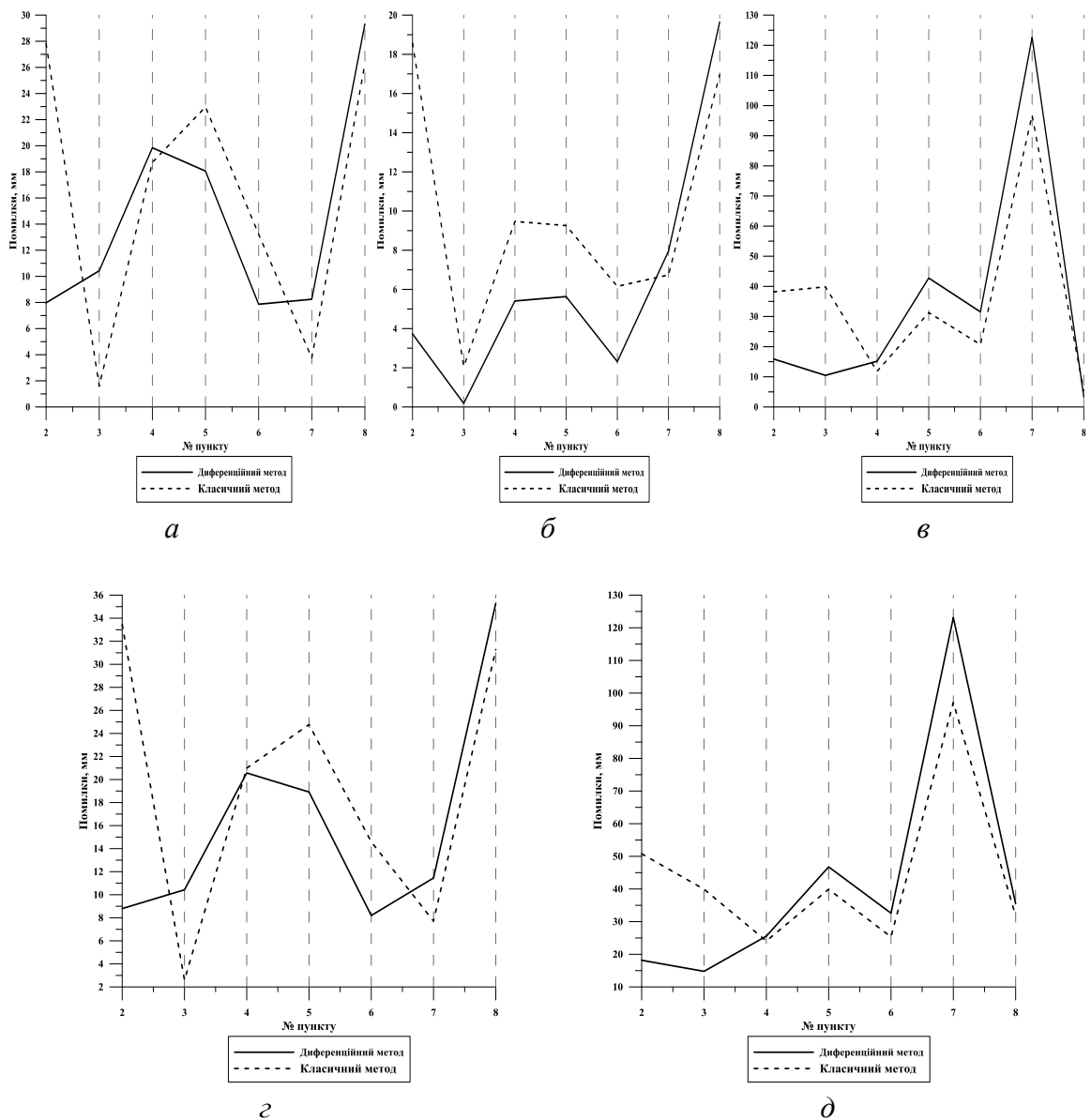


Рис. 2. Зміна помилок у визначенні координат пунктів за диференційним та класичним параметричним методами:
 а – помилки δx ; б – помилки δy ; в – помилки δh ;
 г – помилки в плані; д – помилки в просторі

Результати дослідження апостеріорної оцінки точності у визначенні координат за двома методами представлено у табл. 3. Порівнявши середні середньоквадратичні похибки та помилки у визначених координатах пунктів мережі, для яких вектори обчислені в програмному пакеті LGO, можна стверджувати, що для диференційного методу похибки менші за помилки на 20%, а для класичного параметричного – менші на 60%, що підтверджує наявність систематичних похибок.

Таблиця 3

Середні квадратичні похибки координат пунктів, визначених за диференційним і класичним параметричним методами (вектори обчислені в програмному пакеті LGO)

| № пункту | m_x диф, мм | m_x клас, мм | m_y диф, мм | m_y клас, мм | m_h диф, мм | m_h клас, мм | m план диф, мм | m план клас, мм | m прос диф, мм | m прос клас, мм |
|----------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 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 табл. 4 та 5 і на рис. 3 відображені результати опрацювання мережі (вектори обчислені в програмному пакеті ТВС) за диференційним і класичним параметричним методами. З рис. 3, в видно, що на осі h результати є приблизно однаковими (рис. 3, в), за винятком пункту 8. Та якщо розглянути результати опрацювання мережі в плані та просторі (рис. 3, г; 3, д), то ефективність диференційного методу становить 15% порівняно з класичним параметричним методом.

Таблиця 4

Помилки координат пунктів мережі, визначених за диференційним і класичним параметричним методами (вектори обчислені в програмному пакеті ТВС)

| № пункту | δx диф, мм | δx клас, мм | δy диф, мм | δy клас, мм | δh диф, мм | δh клас, мм | δ план диф, мм | δ план клас, мм | δ прос диф, мм | δ прос клас, мм |
|------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 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 |
| серед | 15,3 | 16,9 | 5,1 | 8,8 | 11,6 | 10,6 | 16,4 | 19,3 | 23,1 | 26,7 |

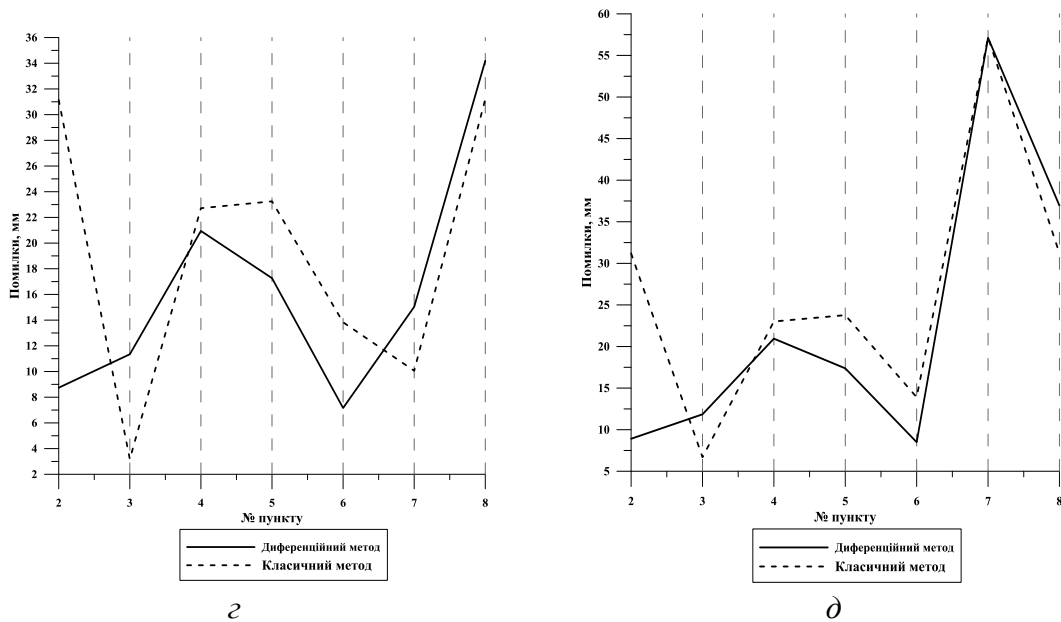
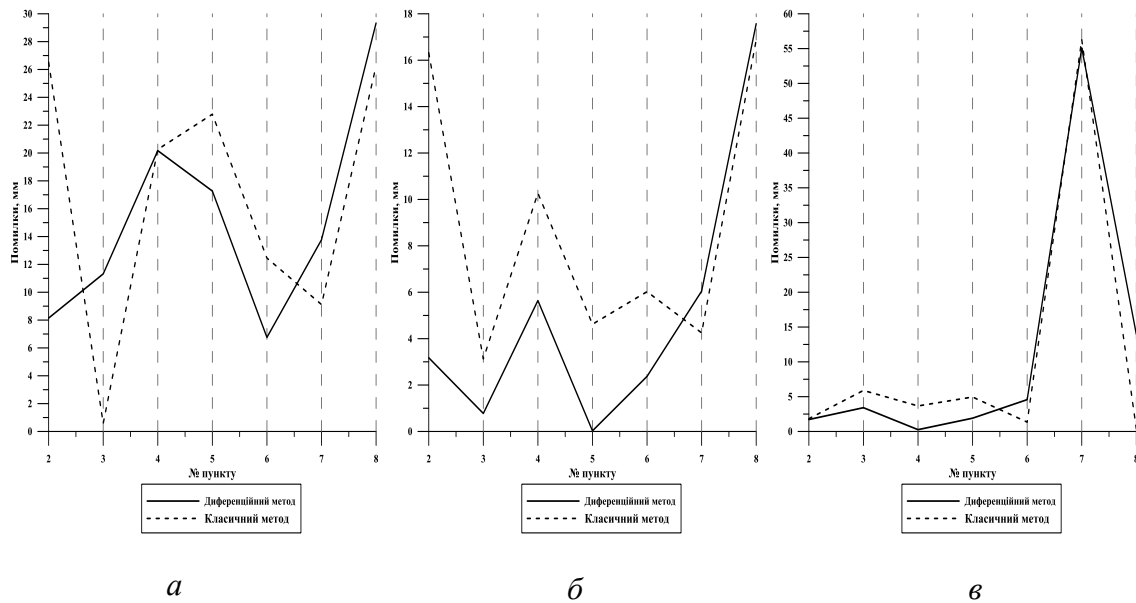


Рис. 3. Зміна помилок у визначенні координат пунктів за диференційним та класичним параметричним методами
а – помилки δx ; *б* – помилки δy ; *в* – помилки δh ;
г – помилки в плані; *д* – помилки в просторі

У табл. 5 представлені дослідження апостеріорної оцінки точності визначення координат за двома методами мережі, для якої вектори обчислені в програмному пакеті ТВС. Результати свідчать, що точність визначення координат за класичним методом є вищою, ніж за запропонованим диференційним. Ці результати, як і для попередніх мереж, зумовлені тим, що кількість рівнянь поправок за класичним методом є більшою, ніж за диференційним. За результатами опрацювання за двома

методами мережі (вектори обчислені в програмному пакеті ТВС) виявлено, що середньоквадратичні похибки, визначені за диференційним методом у середньому менші за помилки на 7%, а за класичним параметричним методом вони в середньому менші на 45%, що ще раз підтверджує наявність систематичних похибок у вимірах та ефективність урівноваження мереж за диференційним методом.

Таблиця 5

**Середні квадратичні похибки координат пунктів, визначених
за диференційним і класичним параметричним методами
(вектори обчислені в програмному пакеті ТВС)**

| № пункту | m_x диф, мм | m_x клас, мм | m_y диф, мм | m_y клас, мм | m_h диф, мм | m_h клас, мм | m план диф, мм | m план клас, мм | m прос диф, мм | m прос клас, мм |
|----------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| 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 |

У табл. 6 та на рис. 4 наведено зведені результати визначення середніх помилок з опрацювання мереж за диференційним і класичним методами, а в табл. 6 – середні середньоквадратичні похибки за результатами урівноваження. В підсумку середні помилки визначення координат пунктів для мережі I та II на 10-20% менші за результати, отримані за диференційним методом урівноваження порівняно з класичним, що ще раз доводить ефективність запропонованого диференційного методу урівноваження, навіть за умов обчислення векторів за допомогою різних програмних продуктів.

Таблиця 6

**Середні помилки координат, визначених за диференційним та класичним
параметричним методами**

| Опрацювання в програмному пакеті | δx диф, мм | δx клас, мм | δy диф, мм | δy клас, мм | δh диф, мм | δh клас, мм | δ план диф, мм | δ план клас, мм | δ прос диф, мм | δ прос клас, мм |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 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 |

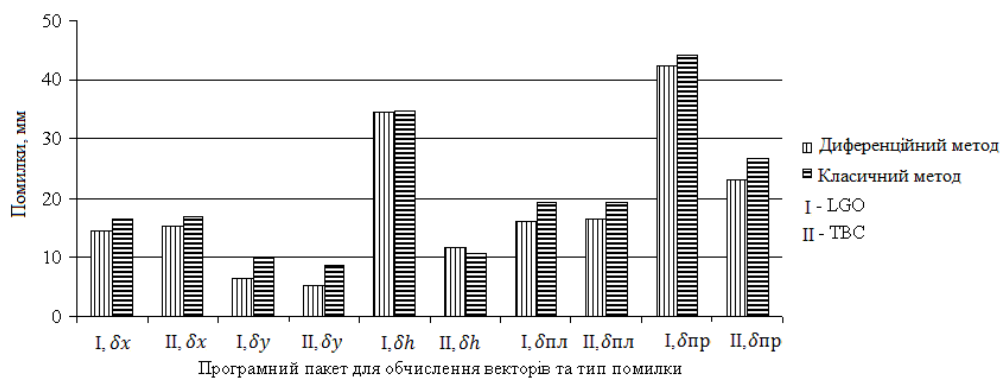


Рис. 4. Середні помилки координат, визначених за диференційним та класичним параметричним методами за результатами опрацювання трьох мереж

Таблиця 7

Середні середньоквадратичні похибки визначених координат за диференційним та класичним параметричним методами

| Опрацювання в програмному пакеті | m_x | m_x | m_y | m_y | m_h | m_h | $m_{план}$ | $m_{план}$ | $m_{прост}$ | $m_{прост}$ |
|----------------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|------------|------------|-------------|-------------|
| | диф, мм | клас, мм | диф, мм | клас, мм | диф, мм | клас, мм | диф, мм | клас, мм | диф, мм | клас, мм |
| 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 підставі виконаних досліджень виявлено, що результати опрацювання вимірів ГНСС-мереж в умовах, рекомендованих для виконання ГНСС-спостережень за розробленим диференційним методом, дає змогу частково вилучити з опрацювання систематичні похибки, які проявляються під час опрацювання ГНСС-мереж за класичним методом. Ефективність диференційного методу урівноваження порівняно з класичним параметричним становить 10-20%, але тільки для ідеальних умов видимості супутників, у разі обмеження видимості ефективність запропонованого методу є вищою, що пов'язано з підвищенням впливу систематичних похибок.

Помилки у визначенні координат пунктів за диференційним методом є практично співвимірними з середньоквадратичними похибками, отриманими з урівноваження мереж, натомість за умови опрацювання мереж за класичним методом помилки значно перевищують визначені параметри точності мереж.

Висновки

1. Розроблено диференційний метод опрацювання ГНСС-вимірів з метою вилучення систематичних похибок, які виникають за одночасних ГНСС-спостережень.
2. Ефективність диференційного методу апробовано на мережах з ідеальними умовами видимості супутників (повністю відкритий горизонт) і з обмеженою видимістю супутників. Результати опрацювання мереж перевірено у двох програмних пакетах (LGO, TBC).

3. Похибки визначення координат за диференційним методом порівняно з класичним параметричним методом для мереж з ідеальними умовами видимості супутників на 10-20% є меншими. Для мереж з незадовільними умовами спостережень (кут відсічки супутників становив 20^0) ефективність диференційного методу порівняно з класичним параметричним методом становить 10-50%.

4. Розроблену методику слід застосувати для опрацювання ГНСС-вимірів, які виконують за декілька сесій на мережах, призначених для геодинамічних полігонів, і для моніторингу деформацій великих інженерних споруд.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грицюк Т.Ю. До питання розробки методики моніторингу вертикальних зміщень інженерних споруд ГЕС за допомогою GPS-технологій / Т.Ю. Грицюк // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS-технології: Матеріали XII міжнародного науково-технічного симпозіуму (м. Алушта). – Алушта: ЛАГТ, 2007. – С. 215-219.

2. Тревого І. Метрологічна атестація еталонного базиса технологією GNSS / І. Тревого, І. Цюпак // Метрологія. – 2014. – С. 381-384.

3. Третяк К.Р. Аналіз стійкості пунктів системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС / К.Р. Третяк, С.Л. Петров, Ю.І. Голубінка, Ф. К. Ф. Аль-Алусі // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2014. – Вип. 80. – С. 5-19.

4. Третяк К.Р. Урівноваження диференційним методом ГНСС мереж з обмеженим доступом до супутникових сигналів / К.Р. Третяк, К.Б. Смолій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2015. – Вип. 81. – С. 25-45.

5. Fritsche M., Dietrich R., Knöfel C., Rülke A., Vey S., Rothacher M., Steigenberger P. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. Geophysical research letters, 2005, Vol. 32, Issue 23, L23311, doi:10.1029/2005GL024342.

6. Mosavi M., Azarshahi S., Emamgholipour I., Abedi A. Least squares techniques for GPS receivers positioning filter using pseudo-range and carrier phase measurements. Iranian Journal of electrical and electronic engineering, 2014, Vol. 10, No. 1, pp. 18-26.

7. Schmid R., Steigenberger P., Gendt G., Ge M., Rothacher M. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. Journal of Geodesy, 2007, Vol. 81, Issue 12, pp. 781-798.

8. Сайт центру SOPAC [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml>. – Назва з екрана.

REFERENCES

1. Grycjuk T.Ju. (2007). Do pytannya rozrobky metodyky monitorynhu vertykal'nykh zmishchen' inzhenernykh sporud HES za dopomohoyu GPS tekhnolohiy [On the development of methods of monitoring the vertical displacement of hydroelectric engineering structures using GPS technology]. Zbirnyk naukovykh prac' XII mizhnarodnogo naukovy-tehnychnogo sympoziumu "Geoinformacijnyj monitoryng navkolyshn'ogo seredovyshha GPS i GIS-tehnologii" Scientific Papers XII international scientific symposium "Geoinformation monitoring of environment GPS and GIS-technologies". (pp. 215-219). [in Ukraine].

2. Trevogo I., Cjupak I. (2014). Metrologichna atestacija etalonnogo bazysa tehnologijeju GNSS [Metrological certification of reference bases using GNSS technology]. Metrologija Metrology. (pp. 381-384). [in Ukraine].
3. Tretyak K.R., Petrov S.L., Holubinka Yu.I., Al-Alusi F.K.F. (2014). Analiz stiykosti punktiv systemy avtomatyzovanoho heodezychnoho monitorynhu inzhenernykh sporud Kanivs'koyi HES [Analysis of stability of points of automated geodetic monitoring of engineering structures kanev HPP]. Gheodezija, kartohrafija i aerofotozнимannja Geodesy, Cartography and Aerial Photography. Vol. 80. (pp. 5-19). [in Ukraine].
4. Tretyak K.R., Smolij K.B. (2015). Urivnovazhennya dyferentsiynym metodom HNSS merezh z obmezhenym dostupom do suputnykovykh syhnaliv [Differential method's adjustment for GNSS networks with limited access to satellite signals]. Gheodezija, kartohrafija i aerofotozнимannja Geodesy, Cartography and Aerial Photography. Vol. 81. (pp. 25-45). [in Ukraine].
5. Fritsche M., Dietrich R., Knöfel C., Rülke A., Vey S., Rothacher M., Steigenberger P (2005). Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. Geophysical research letters. Vol. 32, Issue 23. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL024342/full>.
6. Mosavi M., Azarshahi S., Emamgholipour I., Abedi A (2014). Least squares techniques for GPS receivers positioning filter using pseudo-range and carrier phase measurements. Iranian Journal of electrical and electronic engineering. Vol. 10. No. 1. (pp. 18-26).
7. Schmid R., Steigenberger P., Gendt G., Ge M., Rothacher M (2007). Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. Journal of Geodesy. Vol. 81. Issue 12. (pp. 781-798).
8. Sayt tsentru SOPAC [Site of centr SOPAC] Retrieved from <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml> [in USA].

**К.Р. Третьак,
К. Б. Смолий,
О.В. Серант**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УРАВНИВАНИЯ ГНСС-СЕТЕЙ

С целью максимального извлечения систематических погрешностей на этапе обработки ГНСС-сетей, созданных на основе нескольких сессий наблюдений, разработан дифференциальный метод их уравнивания. В дифференциальном методе предлагается частично заменить уравнения поправок измеренных векторов уравнениями поправок разниц этих векторов. Выполнено сравнение результатов уравнивания двух сетей с идеальными условиями видимости и с ограниченным доступом к спутникам. Эффективность дифференцированного метода уравнивания ГНСС-измерений по сравнению с классическим параметрическим методом составляет 10-50%.

Ключевые слова: погрешности ГНСС-измерений, дифференциальный метод уравнивания, параметрический метод уравнивания.

**K. R. Tretyak,
K. B. Smoliy,
O.V. Serant**

RESEARCH EFFICIENCY ADJUSTMENT FOR GNSS-NETWORKS

Today GNSS measurements are widely used for deformation's monitoring of engineering buildings. Namely, the method of GNSS-measurements. Basically, modern methods of GNSS-observations' results' processing allow us to resolve only random errors. Differential method's adjustment for GNSS networks is proposed to maximal reduces the influence of systematic errors on the results of observations, which are based on several observations sessions. In differential method instead of the correction equations for vectors partly making the correction equations for differences simultaneously measured vectors is proposed. Comparison the results of adjustment one network with ideal condition (but vectors obtained from two different program products) and three networks with complex conditions of access to satellite signals. The results of the adjustment by differential and classic parametric methods were compared with reference values of the coordinates of the points defined by the center SOPAC. The effectiveness of differential method adjustment of GNSS-observations compared to the classical parametric method is 10-50%.

Keywords: *GNSS-measurements errors, differential method adjustment, classical parametric method adjustment.*

Надійшла до редакції

25.10.2015

УДК 528.48

В.М. Гладілін, канд. техн. наук, професор
кафедри аерокосмічної геодезії,
Національний авіаційний університет

П.О. Чуланов, ст. викл. кафедри інженерної геодезії,

Н.С. Шудра, ст. викл. кафедри інженерної геодезії,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ВИЗНАЧЕННЯ МОДЕЛІ ЗМІЩЕННЯ ТОЧОК ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСАХ

У статті запропоновано розглянути визначення моделі горизонтальних та вертикальних векторів зміщення точок (деформацій) промислового обладнання як динамічної системи в тривимірному просторі.

Моделювання виконано на основі складання векторів за правилом паралелограма та множення векторів.

Сучасне визначення і правильне використання даних про деформації дасть можливість збільшити строк планової та безпечної експлуатації промислового обладнання.

Ключові слова: *деформації, часткові (кутові, горизонтальні, вертикальні) деформації, відносні деформації.*