

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

Савчин Ігор Романович

УДК 528.482:004.052

**ОПТИМІЗАЦІЯ АКТИВНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ МОНІТОРИНГУ
ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2015

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 і
архітектури, м. Київ;

кандидат технічних наук
Кучер Олег Васильович,
перший заступник директора з наукової роботи
Науково-дослідного інституту геодезії і картографії, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться «___» _____ 2015р. 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 II навч. корп.

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

Автореферат розісланий «___» _____ 2015р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ к.т.н., доцент Паляниця Б. Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Значна кількість діючих гідротехнічних споруд в Україні є потенційно небезпечними об'єктами, оскільки за багато років експлуатації майже вичерпали свій технічний ресурс. Споруди або окремі їх частини деформуються під впливом різних чинників, зокрема: зміни стиску ґрунтів, руху важкого транспорту або важких агрегатів у споруді, вібрації, зовнішніх умов (змінної вологості ґрунту та температури), а також у результаті дії чинників геологічного (зсувів, карстових явищ) та сейсмічного характеру (землетрусів, рухів тектонічних плит) тощо.

Деформації гідротехнічних споруд можуть призвести до серйозних наслідків, таких як загибель людей, аварій, затоплення великих територій, забруднення і деградація ґрунтів і поверхневих та підземних вод, повітря, зміна рівня ґрунтових вод та багато інших. Через це виникає потреба проведення систематичних досліджень руху земної поверхні, тектонічних плит, визначення деформацій споруд та технологічного устаткування, кінцевою метою яких є розв'язання проблеми попередження аварійних ситуацій та сприяння нормальній роботі таких об'єктів.

Геодезичний моніторинг деформаційних процесів інженерних споруд ГЕС – це сукупність постійних спостережень за станом даних об'єктів з метою забезпечення умов їх безпечної експлуатації для збереження життя і здоров'я людей, навколишнього середовища та господарської інфраструктури.

У минулому спостереження за деформаціями інженерних споруд здійснювалось, в основному, методами геометричного, тригонометричного нівелювання та методами триангуляції, трилатерації і полігонометрії. В наш час широкого застосування набули методи автоматизованого моніторингу, які призначені для проведення довготривалого, безперервного контролю об'єктів у режимі реального часу. Основна ідея таких методів є інтеграція та поєднання різних компонентів для досягнення максимальної точності та надійності результатів. Найважливіші структурні елементи таких систем: геодезичні, геотехнічні та акусто-сейсмічні давачі, замонтовані на спеціально встановлених геодезичних пунктах. Сукупність геодезичних пунктів, устаткування, ліній зв'язку та програмного забезпечення, призначених для встановлення автоматизованих систем контролю просторових зміщень, називають *активною геодезичною мережею моніторингу (АГММ)*. Оскільки даний метод геодезичного моніторингу є відносно новим, для проектування таких мереж використовують евристичні методи, що спричиняє необхідність розроблення теоретичних засад та універсальних алгоритмів проектування АГММ і апробації технологій проведення вимірювань та опрацювання результатів.

Чинні методи проектування та оптимізації АГММ оперують такими показниками якості геодезичної мережі, як похибки їх положення в плані та по висоті, а також вартість встановлення та експлуатації. Проте в АГММ, які працюють у режимі реального часу, не достатньо оперувати тільки цими показниками. У зв'язку з цим виникає потреба використання додаткових параметрів, які б дали змогу покращити якість геодезичної мережі. Одним з таких параметрів є надійність мережі, під якою розуміють здатність геодезичної побудови враховувати вплив грубих та систематичних похибок, похибок вихідних даних, а також похибок, які перевищують значення 3σ нормального закону розподілу. Особливо актуальною є проблема оцінювання надійності АГММ, де вимірювання проводять безперервно

протягом тривалого періоду в режимі реального часу. У зв'язку з цим виникає потреба розроблення теоретичних засад та алгоритмів оцінювання надійності АГММ та відсіювання спотворених вимірювань, а також дослідження впливу надійності мережі на точність кінцевих результатів.

Дана дисертаційна робота присвячена розробленню методики оцінювання надійності АГММ, а також розв'язанню проблеми оптимізації таких побудов за параметрами точності та надійності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі вищої геодезії та астрономії Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка». Науково-дослідні роботи автора відповідають науковому напрямку кафедри: моніторинг фізичної поверхні Землі та її атмосфери на основі аналізу результатів сучасних наземних і супутникових вимірювань, а також науковій тематиці робіт галузевої науково-дослідної лабораторії «Геодезичного моніторингу та рефрактометрії» (ГНДЛ-18) та навчально-наукової лабораторії «Опрацювання супутникових вимірювань» Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка».

Основні положення дисертаційної роботи були використані для виконання таких госпдоговірних, науково-дослідних робіт:

- «Субпідрядні роботи зі складання технічної документації на встановлення автоматизованої системи контролю просторових зміщень гідротехнічних споруд Усть-Каменогорської та Шульбінської ГЕС» № держ. реєстр. 0114U001220.

- «Надання науково-технічних послуг для встановлення перманентної системи деформаційного моніторингу ГЕС та сумісне опрацювання даних ГНСС та ПСДМ», контракт № УНЕ/Т-DAM2-20/09 додаткова угода №1437.

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

- «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 дисертаційної роботи є оптимізація АГММ інженерних споруд ГЕС із врахуванням параметрів точності та надійності. Для досягнення поставленої мети у роботі розв'язуються такі задачі:

- Встановлення оптимальних критеріїв оптимізації АГММ.
- Розроблення теоретичних основ апріорного оцінювання надійності АГММ.
- Апріорне оцінювання надійності для модельних, діючих та проектних АГММ.
- Розроблення теоретичних основ апостеріорної оптимізації АГММ із врахуванням параметрів точності та надійності.

- Апостеріорне оцінювання надійності та апостеріорна оптимізація результатів вимірювань діючих АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС.

Об'єктом дослідження є активні геодезичні мережі моніторингу інженерних споруд ГЕС.

Предметом досліджень є моніторинг деформаційних процесів ГЕС в режимі реального часу.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі математичного

моделювання та експериментальних і практичних робіт на інженерних спорудах ГЕС вперше теоретично обґрунтовано та розроблено методику апріорного оцінювання надійності просторових та планових АГММ, а також методику апостеріорної оптимізації результатів вимірювань АГММ із врахуванням параметрів точності та надійності. Методика апріорного оцінювання надійності дає можливість оцінити надійність АГММ на стадії проектування, а методика апостеріорної оптимізації АГММ дає можливість підвищити точність результатів врівноваження при незначному погіршенні надійності.

Практичне значення одержаних результатів. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень виконано:

- Проектування та апріорне оцінювання АГММ Усть-Каменогорської та Шульбінської ГЕС (Республіка Казахстан), які до кінця 2016 року будуть практично реалізовані.

- Апріорне та апостеріорне оцінювання надійності діючих АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС, яке враховується в процесі опрацювання.

- Апостеріорну оптимізацію результатів вимірювань діючих АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС, яку можна використовувати для покращення кінцевих результатів опрацювання.

Основні положення, що виносяться на захист.

- Встановлені оптимальні критерії оптимізації АГММ.

- Встановлена залежність надійності від геометричної форми АГММ та схеми вимірювань.

- Сформульовані теоретичні засади та методика апріорного оцінювання надійності АГММ.

- Теоретично обґрунтовано методику апостеріорної оптимізації АГММ із використанням параметрів точності та надійності.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати досліджень дисертаційної роботи, які одержано автором, містяться у 8 публікаціях, опублікованих у співавторстві. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – теоретичне обґрунтування та розроблення методики апостеріорної оптимізації результатів вимірювань АГММ із врахуванням параметрів точності та надійності; апробація розробленої методики при опрацюванні результатів вимірювання АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС; порівняльний аналіз результатів опрацювання АГММ до і після апостеріорної оптимізації. [2] – теоретичне обґрунтування та розроблення методики апріорного оцінювання надійності АГММ та оцінювання надійності діючих (Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС) та проектних (Усть-Каменогорської та Шульбінської ГЕС) АГММ. [3] – теоретичне обґрунтування та розроблення методики апріорного оцінювання надійності, встановлення функціональної залежності надійності від визначника коваріаційної матриці та кількості пунктів у лінійній геодезичній мережі. [4] – теоретичне обґрунтування та розроблення методики апріорного оцінювання надійності та встановлення функціональної залежності між надійністю та геометричною формою мережі з неповною схемою вимірювань. [5] – теоретичне обґрунтування та розроблення методики апостеріорної оптимізації результатів вимірювань АГММ із враху-

ванням параметрів точності та надійності; апробація розробленої методики при опрацюванні результатів добових вимірювань, виконаних в АГММ Дністровської-1 ГЕС. [6] – теоретичне обґрунтування поняття надійності АГММ. [7] – моделювання та опрацювання мереж з різною кількістю використаних надлишкових вимірювань. [8] – апріорне оцінювання надійності модельних та діючих АГММ.

Апробація результатів роботи. Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

- Міжнародній науково-технічній геодезичній конференції «Engineering geodesy» (м. Нойбранденбург, Німеччина) – 2012, 2013 та 2014 рік.
- Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Геоінформаційний моніторинг GPS і GIS – технології» (м. Алушта, Крим) – 2012 та 2013 рік.
- Науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Наукова весна – 2013» (м. Дніпропетровськ) – 2013 рік.
- Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум – 2013» та «Геофорум – 2014» (м. Яворів, м. Львів) – 2013 та 2014 рік.
- Міжнародній конференції «Innowacyjne technologie geodezyjne – zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki» (м. Поланчик, Польща) – 2013 та 2014 рік.
- International symposium on modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields (м. Софія, Болгарія) – 2013 рік.
- Наукових семінарах Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. Результати досліджень за темою дисертаційної роботи містяться у 8 публікаціях, які наведено у списку використаних джерел. З-посеред них: 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав [1, 2]; 3 статті у наукових фахових виданнях України [3, 4, 5]; 3 статті у збірниках матеріалів конференцій [6, 7, 8].

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел (152 найменування). Загальний обсяг дисертації становить 135 сторінок, ілюстрації складають 33 рисунки, 26 таблиць та 9 додатків.

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 досліджень з моніторингу інженерних споруд гідроелектростанцій**» проведено огляд методів моніторингу інженерних споруд ГЕС. Встановлено, що на значній частині українських ГЕС для проведення геодезичного моніторингу використовують класичні методи і тільки приблизно 10–15% ГЕС використовують автоматизовані методи. Використання таких методів дає змогу підвищити оперативність та дозволяє забезпечити комплексне вирішення проблеми спостереження за деформаціями. Проблемами дослідження та створення автоматизованих методів та систем геодезичного

моніторингу займались такі відомі українські та закордонні вчені, як Евстафьев О.В., Могильний С.Г., Яценко А.І., Chrzanowski A., Cranenbroeck J.v, Ding X.L., Rizos C. Проте застосування будь-якого одного методу (навіть автоматизованого) не дає можливості повною мірою характеризувати визначені зміщення інженерних споруд та з'ясувати їх причину. Тому виникає потреба застосування комплексних автоматизованих систем моніторингу, які будуть поєднувати різні методи моніторингу для досягнення високої точності та надійності результатів. Важливим при проектуванні комплексних автоматизованих систем моніторингу є, крім точності, врахування надійності кінцевих результатів. Питанням побудови та оптимізації геодезичних мереж за параметрами точності, надійності та вартості присвячена велика кількість наукових праць вітчизняних і зарубіжних авторів, вагомий внесок для вирішення цієї проблеми зробили такі відомі вчені, як Афонін К.Ф., Войтенко С.Г., Герасименко М.Д., Маркузе Ю.І., Тамутіс З.П., Третьак К.Р., Ярмоленко А.С., Baarda W., Chrzanowski A., Grafarend E., Kuang S.L.

У другому розділі дисертаційної роботи «**Теоретичне обґрунтування методики апріорного оцінювання надійності та апостеріорної оптимізації активних геодезичних мереж моніторингу інженерних споруд гідроелектро-станцій**» розроблено теоретичні засади та методику апріорного оцінювання надійності АГММ та методику апостеріорної оптимізації АГММ із врахуванням параметрів точності та надійності.

Для дослідження надійності АГММ використано метод математичного моделювання, який ґрунтується на теорії ймовірностей, – на законах розподілу випадкових величин. Дослідження проводилося за таким алгоритмом:

а) *Створення математичної моделі АГММ.* За допомогою генератора випадкових чисел моделювалися координати пунктів АГММ $(X_{icm}^0; Y_{icm}^0; Z_{icm}^0)$, які були рівномірно розподілені на заданій території. Оскільки для моніторингу ГЕС використовують локальні мережі, то значення координат пунктів АГММ моделювалися на квадраті 1,5 на 1,5 км. У результаті було створено 1 500 модельних АГММ різної геометричної форми та кількості пунктів.

б) *Апріорне оцінювання точності АГММ.* В усіх моделях АГММ виконувалося апріорне оцінювання точності за умови, що в схему вимірювань АГММ включені всі можливі виміри. Значення похибок вимірювання довжин ліній, горизонтальних та вертикальних кутів, які використовували при апріорному врівноваженні, відповідали технічним параметрам сучасних електронних роботизованих тахеометрів. Також на даному етапі визначали геометричну точність АГММ [3, 4]:

$$m_e = \max(m_i); i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

де m_i – апріорна середня квадратична похибка визначення координат пункту АГММ; n – кількість пунктів у АГММ.

в) *Моделювання зміщень пунктів АГММ.* У межах визначеної геометричної точності АГММ $[-m_e; +m_e]$ моделювалися значення рівномірно розподілених випадкових величин, які приймалися за істинні зміщення пунктів АГММ $(vX_{icm}^i, vY_{icm}^i, vZ_{icm}^i)$. Істинні координати пунктів АГММ у i -му циклі $(X_{icm}^i, Y_{icm}^i, Z_{icm}^i)$ визначали з виразів:

$$X_{icm}^i = X_{icm}^0 + vX_{icm}^i, Y_{icm}^i = Y_{icm}^0 + vY_{icm}^i, Z_{icm}^i = Z_{icm}^0 + vZ_{icm}^i. \quad (2)$$

За координатами $(X_{icm}^i, Y_{icm}^i, Z_{icm}^i)$ для i -го циклу обчислювали істинні довжини ліній (S_{icm}^i) , горизонтальні (Hz_{icm}^i) та вертикальні (Vz_{icm}^i) кути.

г) *Моделювання схеми та процесу вимірювання в АГММ.* Через складну геометрію об'єкта, а також вплив природних та штучних перешкод в більшості АГММ неможливо виконати вимірювання всіх векторів. Тому в досліджуваних АГММ виконано моделювання схеми вимірювань. Під схемою геодезичних вимірювань в мережі розуміють вибір сукупності необхідних та надлишкових вимірювань. У роботі виконувалось дослідження АГММ із різною кількістю пунктів, тому, замість класичного значення кількості використаних надлишкових вимірювань, запропоновано використовувати відсоток використаних надлишкових вимірювань, який обчислювали як [2, 4]:

$$r = \frac{r_{вик} \cdot 100\%}{r_{заг}}, \quad (3)$$

де $r_{заг}$ – кількість всіх надлишкових вимірювань; $r_{вик}$ – кількість використаних надлишкових вимірювань.

Для кожної АГММ було проведено моделювання схем вимірювань, в яких використовується від 20 до 90% кількості всіх надлишкових вимірювань $r_{заг}$.

Також на даному етапі виконувалось моделювання процесу вимірювань в АГММ, під яким розуміють моделювання похибок вимірювання довжин ліній (ΔS^i) , горизонтальних (ΔHz^i) та вертикальних (ΔVz^i) кутів для кожного циклу спостережень. Моделювання значень похибок вимірювань виконувалось у межах нормального закону розподілу для інтервалів $[-m_S; +m_S]$, $[-m_{Hz}; +m_{Hz}]$, $[-m_{Vz}; +m_{Vz}]$, де m_S , m_{Hz} , m_{Vz} – середня квадратична похибка вимірювання довжин ліній, горизонтальних та вертикальних кутів відповідно. Модельні виміряні значення довжин ліній, горизонтальних та вертикальних кутів для i -го циклу визначали з виразів:

$$S_{вим}^i = S_{icm}^i + \Delta S^i, \quad Hz_{вим}^i = Hz_{icm}^i + \Delta Hz^i, \quad Vz_{вим}^i = Vz_{icm}^i + \Delta Vz^i. \quad (4)$$

У результаті в кожній із 1 500 АГММ було проведено моделювання 160 циклів спостережень (по 20 для кожного відсотка використаних надлишкових вимірювань). Загалом було опрацьовано 240 000 модельних циклів спостережень.

д) *Врівноваження модельних вимірювань та обчислення зміщень пунктів в АГММ.* Для визначення врівноважених значень координат пунктів в i -му циклі виконувалось врівноваження мережі параметричним методом. За врівноваженими координатами i -го та нульового циклу обчислено зміщення координат пунктів АГММ між i -м і нульовим циклом спостережень:

$$\nu X_{вим}^i = X_{єрівн}^i - X_{icm}^0, \quad \nu Y_{вим}^i = Y_{єрівн}^i - Y_{icm}^0, \quad \nu Z_{вим}^i = Z_{єрівн}^i - Z_{icm}^0. \quad (5)$$

е) *Обчислення надійності та критеріїв, які характеризують геометрію АГММ.* Після проведеного опрацювання для кожної моделі АГММ та кожного модельного циклу спостережень було обчислено значення відомих критеріїв оптимізації [3, 4]:

- A -критерій – слід коваріаційної матриці – $A = tr(Q)$.
- D -критерій – визначник або детермінант коваріаційної матриці – $D = \det(Q)$.
- E -критерій – максимальне власне число коваріаційної матриці – $E = \lambda_{max}$.
- I -критерій – співвідношення максимального до мінімального власного числа

коваріаційної матриці – $I = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$.

Оскільки дослідження проводили для АГММ із різною кількістю пунктів, то, використовували нормовані значення A та D - критеріїв [3, 4]:

$$A^{\text{норм}} = \frac{\text{tr}(Q)}{n}, \quad D^{\text{норм}} = \sqrt[n]{\det(Q)}, \quad (6)$$

де $N = 2n$ для планових АГММ та $N = 3n$ для просторових АГММ, n – кількість пунктів у АГММ.

Для кожного модельного циклу спостережень було визначено надійність АГММ. Під *надійністю АГММ* $R_{\text{модел}}$ [3, 4] розуміють відсоткове співвідношення між кількістю серій вимірювань, в яких достовірно визначаються зміщення, та загальною кількістю всіх серій. Достовірні серії вимірювань за результатами врівноваження повинні відповідати таким умовам [3, 4]:

- 1) при відсутності зміщень пунктів вплив похибок вимірювань не повинен інтерпретуватися як зміщення пунктів;
- 2) зміщення пунктів у межах точності вимірювань повинні інтерпретуватися як вплив похибок вимірювань;
- 3) зміщення пунктів, більші за точність вимірювань, не повинні інтерпретуватися як вплив похибок вимірювань.

Для визначення надійності АГММ, тобто відсотка достовірних вимірювань введено такий вираз [3, 4]:

$$R_{\text{модел}} = \frac{100}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \text{sign}(|v_{\text{icm}}| + m_z - |v_{\text{вим}}|)^2 + \sum_{i=1}^n \text{sign}(|v_{\text{icm}}| + m_z - |v_{\text{вим}}|)}{2}, \quad (7)$$

де $R_{\text{модел}}$ – надійність модельної АГММ; m_z – геометрична точність АГММ; v_{icm} – модельні зміщення пунктів; $v_{\text{вим}}$ – обчислені зміщення пунктів після врівноваження; sign – функція, яка присвоює значення (+1) виразу $(|v_{\text{icm}}| + m_z - |v_{\text{вим}}|)$, якщо вираз додатний, значення 0 (нуль), якщо вираз дорівнює нулю, і значення (–1), якщо вираз від’ємний.

На основі результатів опрацювання модельних циклів спостережень було обчислено коефіцієнти кореляції між значеннями критеріїв A, D, E, I та надійністю АГММ $R_{\text{модел}}$ (табл. 1) [3].

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції

Кількість пунктів у АГММ	Межі коефіцієнтів кореляції між надійністю АГММ $R_{\text{модел}}$ та значеннями критеріїв			
	A -критерій	D -критерій	E -критерій	I -критерій
6 – 10	0,49–0,65	0,78–0,93	0,40–0,55	0,32–0,65
11 – 15	0,44–0,73	0,88–0,97	0,44–0,59	0,35–0,68
16 – 20	0,57–0,69	0,90–0,95	0,39–0,50	0,30–0,64
21 – 25	0,50–0,67	0,83–0,90	0,47–0,53	0,37–0,67
26 – 30	0,47–0,71	0,80–0,92	0,42–0,52	0,40–0,60

Аналізуючи табл. 2, можна зробити висновок, що значення коефіцієнтів $a(r)$ та $b(r)$ для планових АГММ зростають із збільшенням відсотка використаних надлишкових вимірювань. На рис. 2 представлено графіки залежності між відсотком використаних надлишкових вимірювань і значеннями коефіцієнтів $a(r)$ та $b(r)$ для планових АГММ.

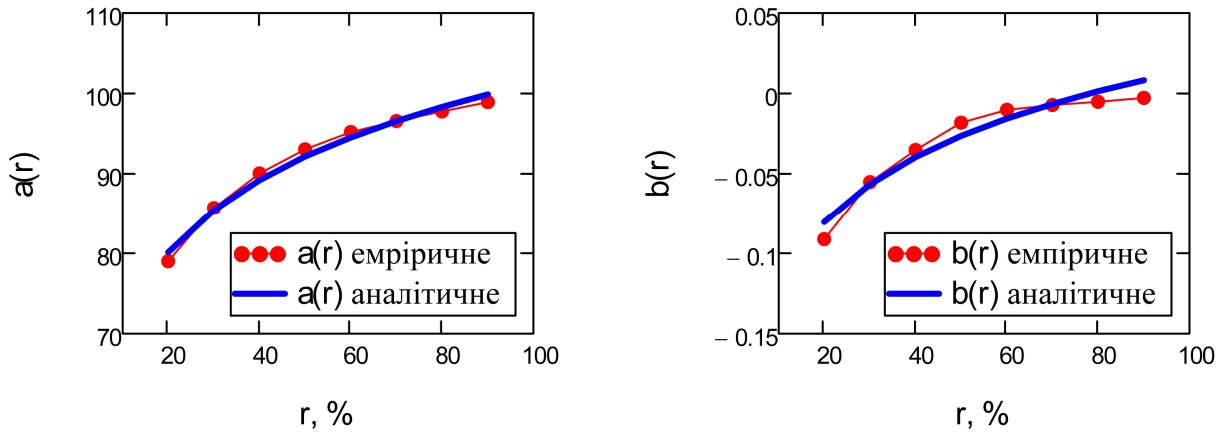


Рис. 2. Залежність значень коефіцієнтів $a(r)$ та $b(r)$ від відсотка використаних надлишкових вимірювань r для планових АГММ

Отримані криві в загальному вигляді можна записати за допомогою логарифмічних функцій типу [2, 4]:

$$a(r) = c + d \cdot \ln(r), \quad b(r) = e + f \cdot \ln(r), \quad (9)$$

де c , d , e , f – невідомі коефіцієнти.

Виконавши апроксимацію поданих кривих (див. рис. 2) методом найменших квадратів, було отримано значення невідомих коефіцієнтів c , d , e та f для планових АГММ. Підставивши значення одержаних коефіцієнтів у вирази (9), одержимо функціональні залежності для визначення значень коефіцієнтів $a(r)$ та $b(r)$ для планових мереж, точність визначення значень даних коефіцієнтів становить відповідно 0,715 та 0,004.

$$a(r) = 40.821 + 13.13 \cdot \ln(r), \quad b(r) = -0.257 + 0.059 \cdot \ln(r). \quad (10)$$

Підставивши отримані функціональні залежності (10) у вираз (8), одержимо функцію, яка описує залежність надійності R від нормованого значення детермінанта коваріаційної матриці $D^{норм}$ та відсотка використаних надлишкових вимірювань r для *планових АГММ*:

$$R = (40.821 + 13.13 \cdot \ln(r)) \cdot (D^{норм})^{(-0.257 + 0.059 \cdot \ln(r))}. \quad (11)$$

Точність визначення надійності планових АГММ R із застосуванням даної функціональної залежності становить 0,2–0,6%.

Аналогічно виведено функціональні залежності надійності R від нормованого значення детермінанта коваріаційної матриці $D^{норм}$ та відсотка використаних надлишкових вимірювань r для *просторових АГММ*:

$$R = (25.3 + 14.5 \cdot \ln(r)) \cdot (D^{норм})^{(-0.071 + 0.014 \cdot \ln(r))}. \quad (12)$$

Точність визначення надійності просторових АГММ R із застосуванням даної функціональної залежності становить 0,1–0,3%.

У процесі дослідження було встановлено, що значення $D^{норм}$ для більшості

модельних АГММ перебуває в межах 0,001–1,0. Відповідно і значення надійності для таких мереж коливається в межах 80–100%. Але траплялися АГММ із значно меншим значенням надійності 60–90%, що, на нашу думку, зумовлене витягнутою геометричною формою та великою різницею між максимальними та мінімальними довжинами ліній.

Основними етапами методики апріорного оцінювання надійності просторових та планових АГММ є:

- *Етап 1. Формування файлу координат пунктів АГММ.* На даному етапі необхідно підготувати значення приблизних координат всіх пунктів АГММ, для якої буде проводитися оцінювання надійності.

- *Етап 2. Формування схеми вимірювань в АГММ.* Виконується формування вимірювань, які були (або будуть) виміряні. Якщо вимірювання не виконувалися, то їх значення можна отримати шляхом моделювання. Обчислюється кількість вимірів, які були (або будуть) виміряні, та відсоток використаних надлишкових вимірювань.

- *Етап 3. Врівноваження вимірювань в АГММ.* Проводиться врівноваження вимірювань в АГММ параметричним методом.

- *Етап 4. Оцінювання надійності АГММ.* На даному етапі визначається детермінант коваріаційної матриці та проводиться оцінювання надійності, використовуючи функціональну залежність (11) для планових та (12) для просторових АГММ.

Сучасні автоматизовані системи комплексного моніторингу деформацій ґрунтуються на стаціонарно встановлених роботизованих тахеометрах із автоматичним розпізнаванням відбивачів та стаціонарно встановлених ГНСС-приймачах. Дане устаткування проводить безперервні автоматизовані вимірювання, що призводить до постійного збільшення масивів даних. Очевидно, під час реальних вимірювань певна кількість таких даних буде спотворена похибками, які перевищують значення 3σ нормального закону розподілу. Відсіювання таких вимірювань із загальної сукупності всіх даних (апостеріорна оптимізація) є ефективним способом підвищення точності кінцевих результатів врівноваження мережі. Але не досліджено, як видалення вимірювань, спотворених цими похибками, вплине на надійність АГММ. У зв'язку з цим виникає задача визначення кількості видалених вимірювань, при якій співвідношення точності та надійності буде оптимальним.

Для проведення досліджень у даному напрямку було використано метод математичного моделювання. Результати досліджень подамо на прикладі модельної лінійної АГММ, яка складається із 16 пунктів (рис. 3) [1]. Два пункти АГММ прийнято за вихідні.

Оскільки виконувалось дослідження лінійних геодезичних мереж, то для представленої модельної АГММ було обчислено значення довжин усіх векторів. Використовуючи нормальний закон розподілу, проведено моделювання похибок вимірювань довжин усіх векторів. Значення похибок моделювали в межах геометричної точності мережі m_2 . На рис. 4 подано гістограму розподілу значень модельних похибок вимірювання довжин векторів Δ в модельній АГММ [1].

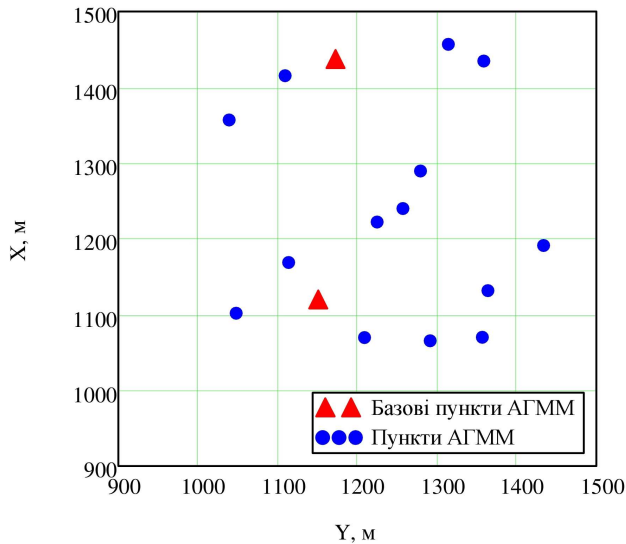


Рис. 3. Схема розташування пунктів модельної АГММ

Аналізуючи цю гістограму, можна зауважити, що частина вимірювань в модельній АГММ має похибки, які перевищують загальний фон усіх похибок. Очевидно, аналогічне спостерігається і під час реальних вимірювань, що зумовлено особливостями об'єкта, багатошляховістю сигналу, рефракцією, незадовільною видимістю супутників тощо.

Дослідження проводилось, використовуючи ітераційну процедуру вилучення вимірів. Тобто, послідовно виконувалось врівноваження АГММ параметричним методом, за результатами врівноваження визначали та відсіювали вимір із максимальною поправкою v . Поправки визначали за такою залежністю:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{L}, \quad (13)$$

де \mathbf{A} – матриця коефіцієнтів рівнянь поправок, $\Delta \mathbf{x}$ – поправки у наближені значення шуканих параметрів, \mathbf{L} – матриця-вектор вільних членів.

Після кожної ітерації врівноваження АГММ та відсіювання виміру із максимальною поправкою обчислювали значення надійності АГММ за функцією (11) та значення середньої квадратичної похибки одиниці ваги за виразом:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum v^2}{r_{\text{вик}}}}. \quad (14)$$

Реалізацію ітераційної процедури вилучення вимірів припиняють, коли у мережі залишається один надлишковий вимір.

На основі проведеного дослідження для модельної АГММ було побудовано графіки зміни точності та надійності мережі при послідовному вилученні вимірів із максимальними поправками (рис. 5). Аналізуючи подані графіки, можна зауважити, що на початку відсіювання значення μ зменшується швидше, ніж у подальшому. Це пов'язано з першочерговим вилученням вимірювань, які мають значно більші похибки, ніж усі решта, тобто виходять за межі значення 3σ нормального закону розподілу. На закінченні процесу вилучення, зміна μ є мінімальна, що пояснюється вилученням вимірів із мінімальними похибками, які практично не впливають на μ . [1]

Натомість, значення R на початку відсіювання зменшується повільно, що зумовлено великою кількістю надлишкових вимірювань. На закінченні процесу

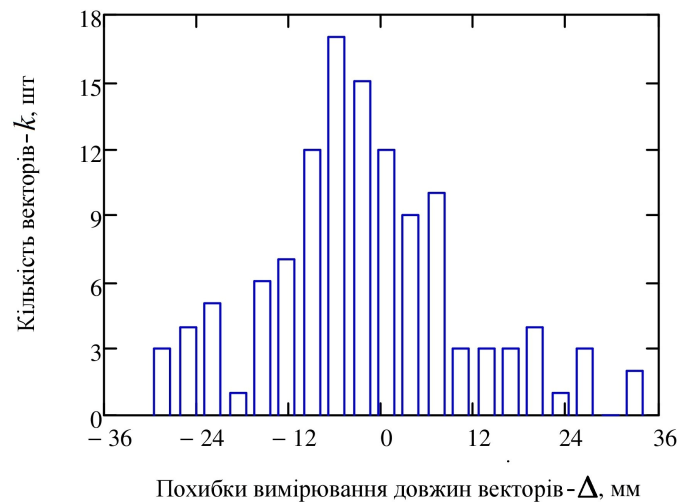


Рис. 4. Гістограма розподілу значень модельних похибок вимірювань

вилучення значення R зменшується значно швидше, що є, очевидно, спричинено вже відносно малою кількістю надлишкових вимірювань. Тобто, збільшується імовірність того, що при опрацюванні певної серії вимірювань, вилученні виміри із максимальними поправками ν не будуть вимірами із максимальними похибками вимірювань Δ . [1]

Отже, відсіювання вимірів із максимальними похибками призводить до покращення точності та погіршення надійності. У зв'язку з цим виникає потреба визначити групу вимірювань, при якій співвідношення точності та надійність буде оптимальним.

Подані криві (див. рис. 5) найкраще можна описати, використовуючи функції виду [5, 1]:

$$\mu(k) = \frac{a_\mu}{b_\mu + k^{c_\mu}}, \quad (15)$$

$$R(k) = a_R \cdot k^{b_R} + c_R \cdot k^{d_R} + e_R, \quad (16)$$

де $a_\mu, b_\mu, c_\mu, a_R, b_R, c_R, d_R$ та e_R – невідомі коефіцієнти.

Параметри $\mu(k)$ та $R(k)$ мають різну фізичну природу та метрику, тому для приведення їх до однієї розмірності будемо оперувати нормованими похідними, які можна отримати, поділивши похідну функції на функцію:

$$\frac{d\mu(k)}{\mu(k)dk} = -\frac{k^{c_\mu-1} \cdot c_\mu}{k^{c_\mu} + b_\mu}, \quad (17)$$

$$\frac{dR(k)}{R(k)dk} = \frac{k^{b_R-1} \cdot a_R \cdot b_R + k^{d_R-1} \cdot c_R \cdot d_R}{k^{b_R} \cdot a_R + k^{d_R} \cdot c_R + e_R}, \quad (18)$$

Для встановлення меж оптимального співвідношення точності та надійності АГММ використано метод другої часткової похідної [1, 5]:

$$\frac{d^2\mu(k)}{\mu(k)dk^2} = \frac{2 \cdot k^{2c_\mu-2} \cdot a_\mu \cdot c_\mu^2}{a_\mu \cdot (k^{c_\mu} + b_\mu)^2} - \frac{k^{c_\mu-2} \cdot (c_\mu-1) \cdot a_\mu \cdot c_\mu}{a_\mu \cdot (k^{c_\mu} + b_\mu)}, \quad (19)$$

$$\frac{d^2R(k)}{R(k)dk^2} = \frac{k^{b_R-2} \cdot (b_R-1) \cdot a_R \cdot b_R}{k^{b_R} \cdot a_R + k^{d_R} \cdot c_R + e_R} + \frac{k^{d_R-2} \cdot (d_R-1) \cdot c_R \cdot d_R}{k^{b_R} \cdot a_R + k^{d_R} \cdot c_R + e_R}. \quad (20)$$

На основі отриманих результатів побудовано графіки зміни значень других нормованих похідних функцій $\mu(k)$ та $R(k)$ (рис. 6). Аналізуючи поданий графік, можна зробити висновок, що максимум функції $\frac{d^2\mu(k)}{\mu(k)dk^2}$ є межею, після якої сповільнюється зменшення параметра $\mu(k)$. Тому виміри, що знаходяться до цієї межі, повинні бути обов'язково відсіянні, бо це виміри із максимальними похибками, які

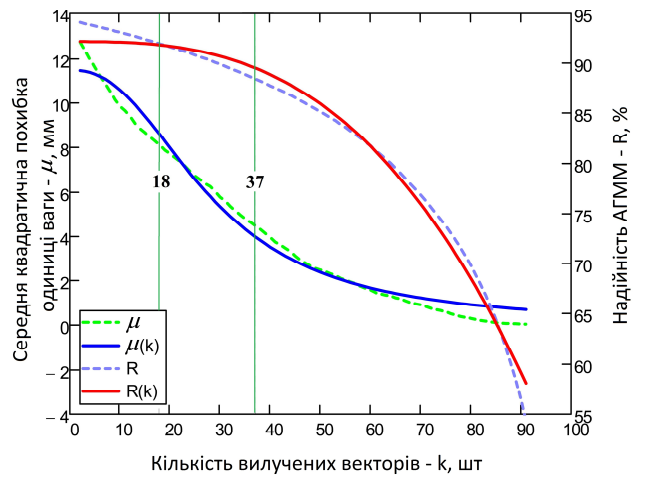


Рис. 5. Зміна μ та R при послідовному вилученні вимірів із максимальними поправками

погіршують точність. Натомість максимум функції $\frac{d^2 R(k)}{R(k)dk^2}$ є межею, після якої значення надійності мережі $R(k)$ починає різко зменшуватися. Тому відсіювати вимірювання після цієї межі не доцільно. Отже, оптимальне співвідношення точності та надійності АГММ знаходиться між максимумами функцій $\frac{d^2 \mu(k)}{\mu(k)dk^2}$ та $\frac{d^2 R(k)}{R(k)dk^2}$ [5, 1].

Для встановлення чіткої кількості відсіяних вимірювань, при яких співвідношення точності та надійності буде найкращим, використано ентропійний підхід [5, 1]. Функціональну залежність для визначення ентропії АГММ можна представити у вигляді суми ентропії точності та надійності:

$$H(\mu, R) = H(\mu) + H(R) = -\log[\mu(k)] - \log[R(k)]. \quad (21)$$

На рис. 7 подано графік зміни значень ентропії від кількості відсіяних вимірів у модельній АГММ.

Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що при кількості вимірювань, яка відповідає максимуму функції $H(\mu, R)$, буде досягнуто оптимальне співвідношення точності та надійності АГММ. Тобто, відсіювання вимірювань, які знаходяться до цієї межі, призводить до значного покращення точності та відносно незначного погіршення надійності АГММ. Натомість вимірювання, які знаходяться після цієї межі, є, на нашу думку, інформативними, тому що їх видалення призводить до різкого погіршення надійності.

Грунтуючись на результатах проведеного дослідження, сформулюємо основні етапи методики апостеріорної оптимізації АГММ із використанням параметрів точності та надійності.

- *Етап 1. Формування файла наближених координат пунктів АГММ.*
- *Етап 2. Формування файла вимірів в АГММ. Якщо виміри не виконувалися, то їх значення можна отримати шляхом моделювання.*
- *Етап 3. Врівноваження вимірювань в АГММ, оцінювання точності (14) та надійності (11), а також відсіювання спотворених вимірювань.*
- *Етап 4. Апроксимація кривих зміни точності та надійності АГММ функціями (15) та (16), які найкраще їх описують.*

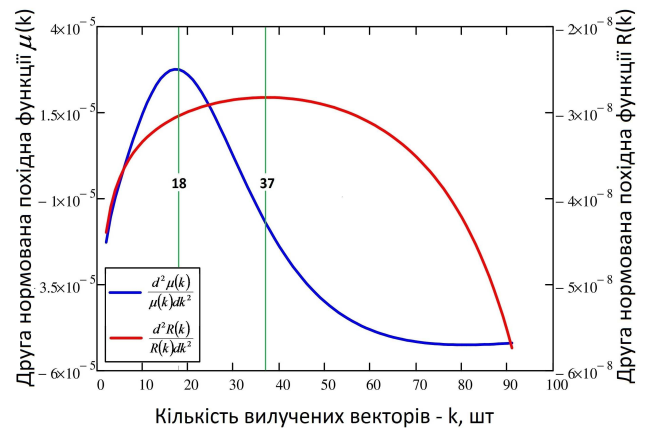


Рис. 6. Зміна значень других нормованих похідних функцій $\mu(k)$ та $R(k)$ від кількості видалених вимірювань

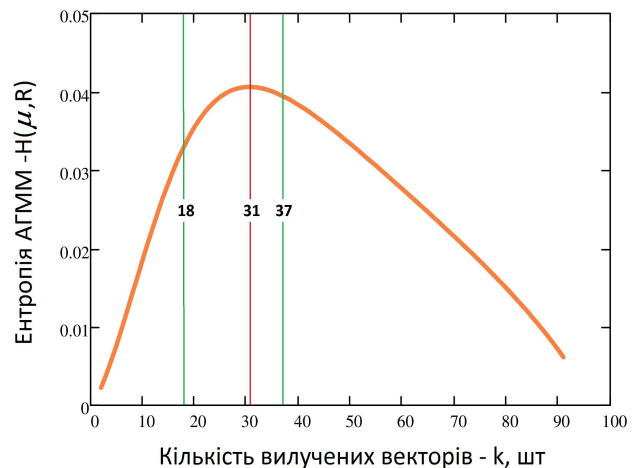


Рис. 7. Зміна значень ентропії АГММ $H(\mu, R)$ від кількості видалених вимірювань

• *Етап 5. Встановлення меж оптимального та найкращого співвідношення точності та надійності АГММ.* Використовуючи метод другої часткової похідної, визначаються межі оптимального співвідношення точності та надійності АГММ, які знаходяться в максимумах функцій (19) та (20). А використовуючи ентропійний підхід, визначається межа найкращого співвідношення точності та надійності АГММ, яка знаходиться в максимумі функцій (21).

Проаналізувавши результати проведених досліджень, можна стверджувати, що, використовуючи представлену методику апостеріорної мережі, яка ґрунтується на алгоритмі послідовного вилучення спотворених вимірювань, можна в режимі реального часу визначити сукупність вимірювань, яку необхідно відсіяти для забезпечення оптимального та найкращого співвідношення точності та надійності АГММ. Запропонована методика апостеріорної оптимізації дає можливість підвищити точність в 1,5–2,8 разів при погіршенні надійності на 2,0–7,0%. Експериментальні дослідження різних модельних мереж виявили, що ці закономірності характерні для АГММ будь-якої конфігурації. Отже, можна зробити висновок, що подану методику можна застосувати для оптимізації будь-яких АГММ із великою кількістю надлишкових вимірювань.

У третьому розділі дисертаційної роботи **«Проектування, апріорне оцінювання надійності та апостеріорна оптимізація активних геодезичних мереж моніторингу інженерних споруд гідроелектростанцій»** виконано проектування і апріорне оцінювання точності та надійності АГММ Усть-Каменогорської та Шульбінської ГЕС, розташованих у східній частині Республіки Казахстан.

На даних АГММ передбачено використання стаціонарно встановлених ГНСС-приймачів, електронних роботизованих тахеометрів, інклінометрів, давачів температури та тиску, а також спеціалізованого програмного забезпечення. Згідно із розробленим проектом для АГММ Усть-Каменогорської ГЕС передбачено встановлення програмного та технічного забезпечення компанії Trimble, а для АГММ Шульбінської ГЕС – устаткування Leica Geosystems AG. Найважливішим для цих АГММ буде геодезичне устаткування. Воно буде рівномірно розміщене на основних інженерних спорудах ГЕС, утворюючи АГММ, які складаються із 10 пунктів для Усть-Каменогорської ГЕС та 7 – для Шульбінської ГЕС; 2 пункти в кожній з АГММ прийнято за вихідні (UKR1, UKR2 та SHR1, SHR2) (рис. 8).

В результаті апріорного оцінювання точності та надійності даних АГММ встановлено, що:

- для АГММ Усть-Каменогорської ГЕС апріорні значення СКП контрольних пунктів коливаються в межах 0,2–0,5 мм, а моніторингових: 1,0–2,8 мм; апріорне значення надійності знаходиться в межах 90,5–99,7%;

- для АГММ Шульбінської ГЕС апріорні значення СКП контрольних пунктів коливаються в межах 0,3–0,8 мм, а моніторингових: 1,0–3,2 мм; апріорне значення надійності знаходиться в межах 92,1–98,6%.

Слід зазначити, що розроблені АГММ Усть-Каменогорської та Шульбінської ГЕС до кінці 2016 року будуть встановлені на даних об'єктах.

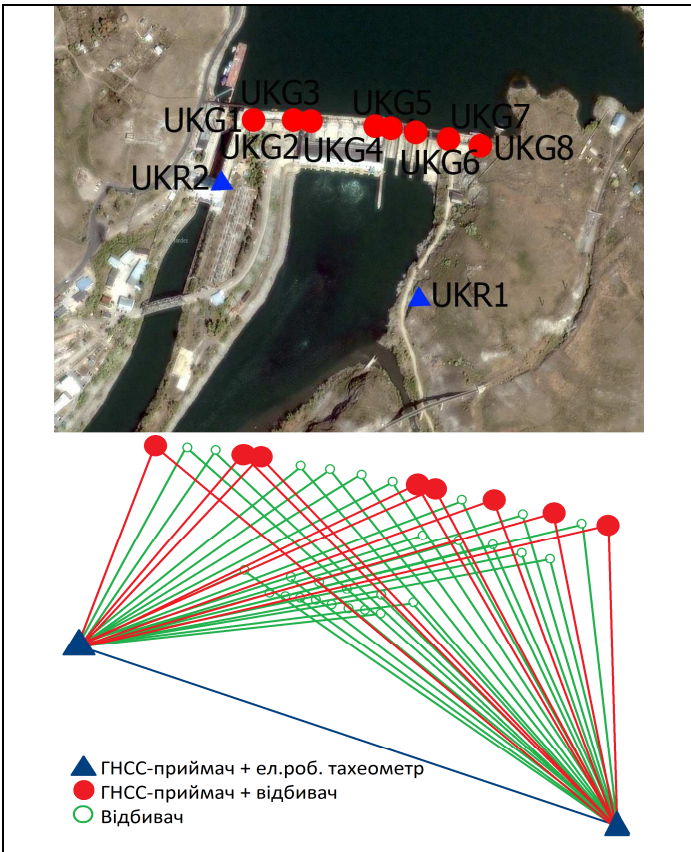


Рис. 8. АГММ Усть-Каменогорської ГЕС

У даному розділі проведено апріорне та апостеріорне оцінювання надійності діючих АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС, а також апостеріорну оптимізацію результатів вимірювань, виконаних у даних мережах із урахуванням параметрів точності та надійності. На цих АГММ стаціонарно встановлені ГНСС-приймачі, електронні роботизовані тахеометри, інклінометри, давачі температури та тиску, а також спеціалізоване програмне забезпечення.

АГММ Дніпровської ГЕС складається із 19 пунктів, (рис. 10); АГММ Дністровської-1 та Канівської ГЕС створені із 14 пунктів, (рис. 11 та 12). В кожній АГММ 2 пункти прийнято за вихідні.

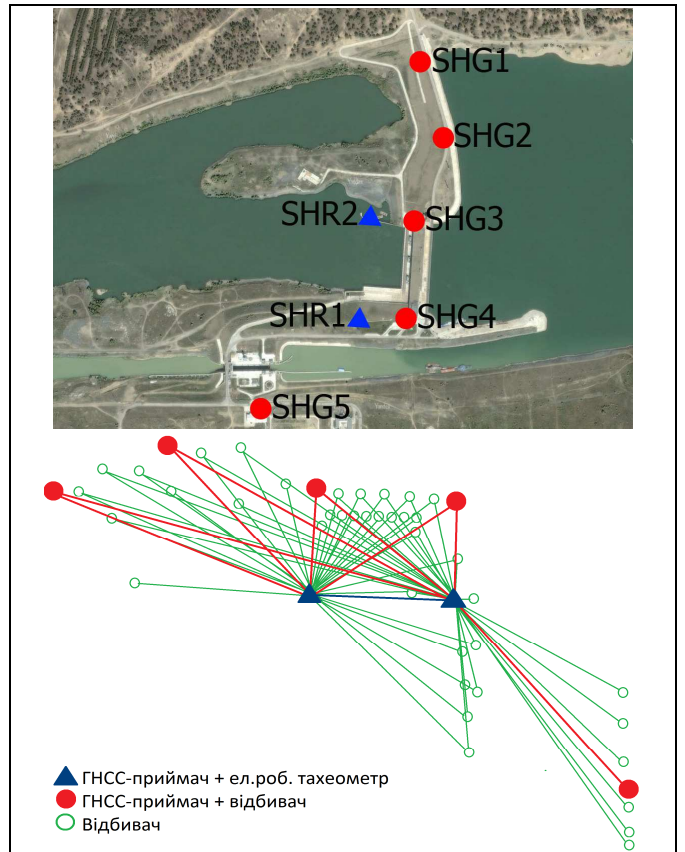


Рис. 9. АГММ Шульбінської ГЕС

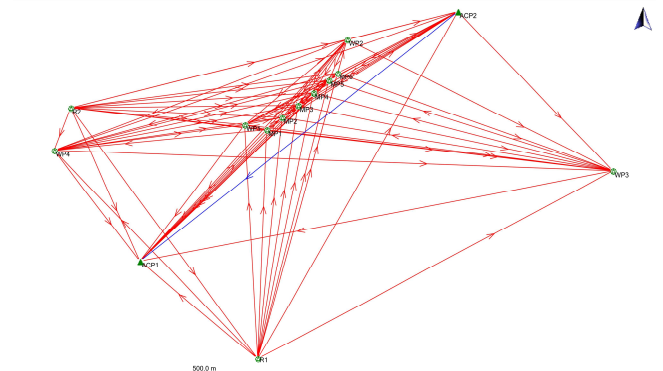


Рис. 11. АГММ Дністровської-1 ГЕС

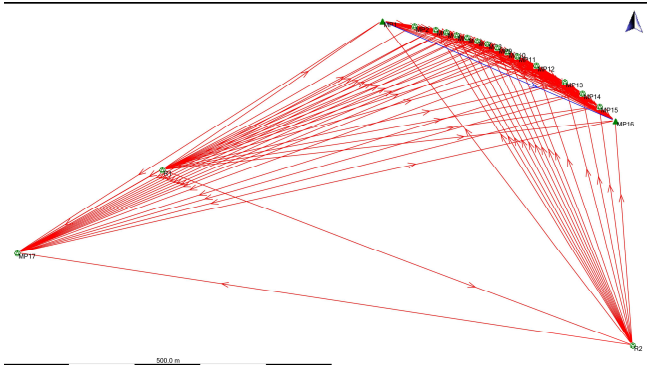


Рис. 10. АГММ Дніпровської ГЕС

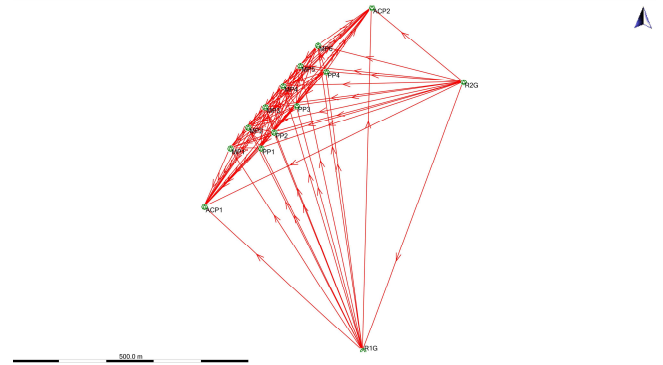


Рис. 12. АГММ Канівської ГЕС

У результаті апріорного оцінювання надійності даних АГММ встановлено, що:

- для АГММ Дніпровської ГЕС значення апріорної надійності коливаються в межах 85,3–93,3%;
- для АГММ Дністровської-1 ГЕС значення апріорної надійності коливаються в межах 85,9–93,6%;
- для АГММ Канівської ГЕС значення апріорної надійності коливаються в межах 85,7–93,5%.

Для кожної АГММ було підготовлено та опрацьовано 50 серій двогодинних вимірювань, виконаних ГНСС-приймачами та електронними роботизованими тахеометрами. Дані серії вибиралися з добових файлів вимірювань. Слід зазначити, що результати опрацювання різних серій вимірювань у всіх АГММ дали практично ідентичний результат. Тому, для прикладу, представимо послідовність та результати опрацювання однієї серії двогодинних вимірювань у кожній АГММ.

Відповідно до запропонованої методики було виконано послідовне врівноваження та відсіювання вимірювань із максимальними поправками. За результатами апроксимації встановлено значення невідомих коефіцієнтів для функцій (15) та (16), які найкраще описують зміну μ та R при послідовному вилученні вимірювань із максимальними поправками. Побудовано графіки зміни значень других нормованих похідних функцій $\mu(k)$ та $P(k)$ (рис. 13) та ентропії АГММ $H(\mu, R)$ (рис. 14) від кількості вилучених вимірювань.

Аналізуючи графіки (див. рис. 13), можна зауважити, що межі оптимального співвідношення точності та надійності знаходиться між **22-м і 55-м** вилученими векторами для АГММ Дніпровської ГЕС, між **13-м та 36-м** – для АГММ Дністровської-1 ГЕС та між **14-м та 35-м** – для АГММ Канівської ГЕС. Тобто, відсіюючи кількість векторів, які знаходяться в даних межах для кожної АГММ, можна забезпечити оптимальне співвідношення точності та надійності.

Відповідно до розробленої методики межа найкращого співвідношення точності та надійності АГММ знаходиться в максимумі функцій інформаційної ентропії $H(\mu, R)$ Згідно з (рис. 11), при **42-х** вилучених векторах для АГММ Дніпровської ГЕС, при **23-х** – для АГММ Дністровської-1 ГЕС та при **25-х** – для АГММ Канівської ГЕС врівноваження дасть найкраще співвідношення точності та надійності.

Для всіх меж відсіювання обчислено значення середньої квадратичної похибки (СКП) визначення координат пунктів та середнього квадратичного відхилення (СКВ) визначених координат від істинних. За істинні приймали середні значення координат пунктів АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС, обчислені в програмному забезпеченні Bernese GPS Software за результатами 30 денних спостережень. Значення обчислених СКП та СКВ зведено в табл. 4.

Аналізуючи результати, подані в табл. 4, можна простежити, що при вилученні вимірювань із максимальними поправками, значення СКП зменшується, тобто точність постійно зростає, проте значення СКВ, яке є інтерпретацією надійності вимірювань, спочатку зменшується, але пізніше починає зростати. Найменше значення СКВ збігається із межею найкращого співвідношення точності та надійності АГММ.

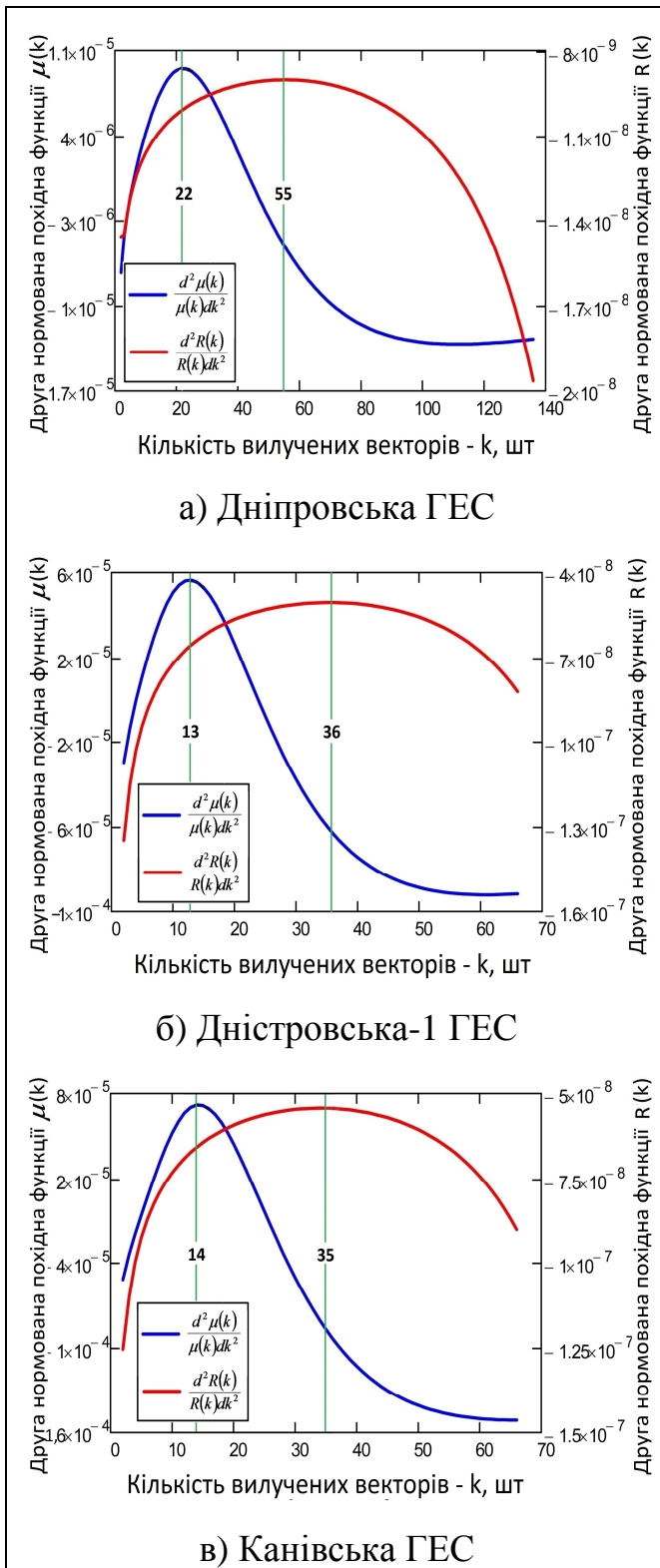


Рис. 13. Зміна значень других нормованих похідних функцій $\mu(k)$ та $R(k)$ від кількості вилучених вимірювань

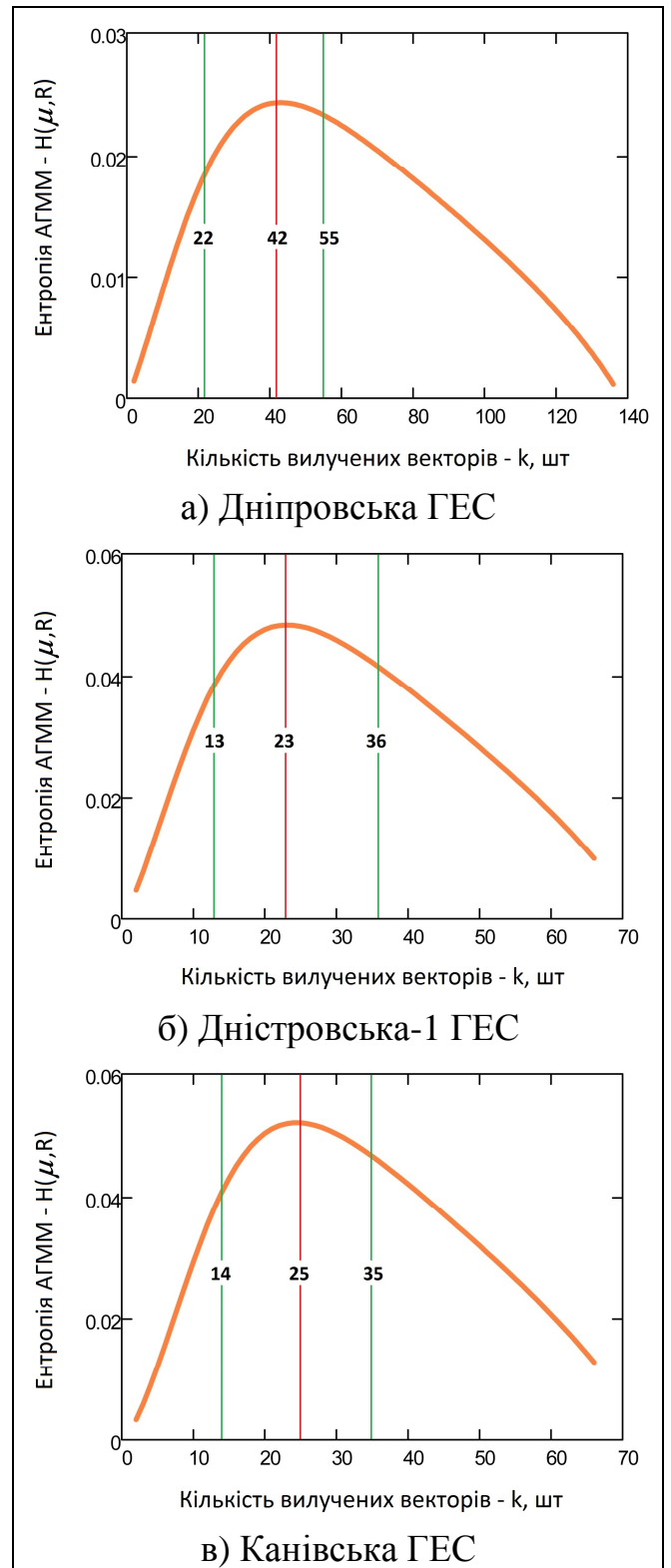


Рис. 14. Зміна значень інформаційної ентропії АГММ $H(\mu, R)$ від кількості вилучених вимірювань

Отримані в результаті апостеріорної оптимізації значення надійності АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС знаходяться в межах визначених апіорних значень. Тому можна зробити висновок, що розроблена методика апіорного оцінювання надійності АГММ дає достовірні результати.

Значення СКП, СКВ та надійності АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС

Дніпровська ГЕС				Дністровська-1 ГЕС				Канівська ГЕС			
Кількість видалених векторів, шт	СКП, мм	СКВ, мм	R, %	Кількість видалених векторів, шт	СКП, мм	СКВ, мм	R, %	Кількість видалених векторів, шт	СКП, мм	СКВ, мм	R, %
0	4,9	3,7	93,6	0	5,2	4,3	93,4	0	5,4	4,5	93,7
22	3,2	2,9	91,6	13	3,6	3,7	91,1	14	3,8	3,9	91,1
42	2,1	1,5	89,2	23	2,7	2,9	88,5	25	2,9	3,2	88,3
55	1,8	2,3	87,3	36	2,1	3,9	83,8	35	2,4	4,0	84,8
90	1,3	3,4	82,3	60	1,6	5,7	56,0	60	1,8	4,8	56,6

Запропонована методика апостеріорної оптимізації АГММ дає можливість суттєво покращити точність при незначних втратах надійності, наприклад для:

- АГММ Дніпровської ГЕС – точність покращується в 2,3 рази при погіршенні надійності на 4,4%;

- АГММ Дністровської-1 ГЕС – точність покращується в 1,9 разів при погіршенні надійності на 4,9%;

- АГММ Канівської ГЕС – точність покращується в 1,9 разів при погіршенні надійності на 5,4%.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що опрацювання результатів вимірювань, виконаних в АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС, повністю підтверджують ефективність застосування розробленої методики апостеріорної оптимізації результатів вимірювань АГММ із урахуванням параметрів точності та надійності. Отже, дану методику необхідно застосувати для оптимізації будь-яких АГММ із великою кількістю надлишкових вимірювань.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу вітчизняних та зарубіжних наукових джерел встановлено, що внаслідок впливу випадкових факторів, які призводять до появи похибок, що перевищують значення 3σ нормального закону розподілу, результати опрацювання вимірювань, виконаних автоматизованими системами моніторингу, не завжди є достовірними. В даний час немає універсальних методів та підходів для оптимізації АГММ та відсіювання спотворених вимірювань, виконаних автоматизованими системами моніторингу в режимі реального часу.

2. На основі методів математичного моделювання встановлено функціональні залежності надійності від геометричних форми та схеми вимірювань в АГММ. Розроблено теоретичні засади та методику апріорного оцінювання надійності планових і просторових АГММ. Встановлено, що точність оцінювання надійності із використанням даної методики становить 0,1–0,6%.

3. Теоретично обґрунтовано та розроблено методику апостеріорної оптимізації АГММ із використанням параметрів точності та надійності. На основі

методів математичного моделювання доведено, що методика дає можливість в 1,5–2,8 разів покращити точність результатів опрацювання АГММ при погіршенні надійності на 2,0–7,0%. Підтверджено можливість використання методики для оптимізації АГММ із різним інструментальним забезпеченням (ГНСС-приймачі, електронні роботизовані тахеометри, електронні нівеліри, інклінометри тощо).

4. На основі виконаних досліджень автором розроблено проекти АГММ Усть-Каменогорської та Шульбінської ГЕС (Республіка Казахстан). Проведено апріорне оцінювання надійності для створених проектів АГММ. Апріорні значення надійності розроблених проектних АГММ Усть-Каменогорської ГЕС та Шульбінської ГЕС знаходяться в межах 90,48–99,68%. До кінця 2016 року проектні АГММ Усть-Каменогорської та Шульбінської ГЕС будуть практично реалізовані.

5. Проведено апріорне та апостеріорне оцінювання надійності діючих АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС. Встановлено, що реальні значення надійності знаходяться в межах визначених апріорних значень. Виконано апостеріорну оптимізацію даних мереж, використовуючи запропоновану методику апостеріорної оптимізації АГММ. Використання даної методики дало можливість покращити точність результатів опрацювання АГММ в 1,9–2,3 рази при незначному погіршенні надійності на 4,4–5,3%. Доведено, що методика дає можливість у режимі реального часу проводити оптимізацію результатів вимірювань та визначати сукупність векторів, які потрібно вилучити з процесу опрацювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

1. Savchyn I. Posteriori optimization of active geodetic monitoring networks / K. Tretyak, I. Savchyn. // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2014. – №96. – P. 67 – 77.
2. Savchyn I. Research of reliability of active geodetic network for deformation monitoring of hydro power plants (HPPs) [Електронний ресурс] / K. Tretyak, I. Savchyn // Съюз на геодезистите и земеустроителите в България: Modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: www.geodesy.fnts-bg.org.

Статті у наукових фахових виданнях України

3. Савчин І. Р. Розроблення методики розрахунку надійності активних моніторингових мереж / К. Р. Третяк, І. Р. Савчин. // Вісник геодезії та картографії. – 2013. – №1 (82). – С. 5 – 10.
4. Савчин І. Р. До питання надійності активних моніторингових мереж / К. Р. Третяк, І. Р. Савчин. // Геодезія картографія і аерофотознімання. – 2013. – №77. – С. 122 – 126.
5. Савчин І. Р. Апостеріорна оптимізація точності та надійності активної геодезичної мережі моніторингу Дністровської ГЕС / К. Р. Третяк, Дж. в. Краненброк, А. Ю. Балан, О. В. Ломпас, І. Р. Савчин // Геодезія картографія і аерофотознімання. – 2014. – №79. – С. 5 – 14.

Тези доповідей та матеріали конференцій

6. Савчин І. Р. Дослідження надійності активної геодезичної мережі моніторингу деформацій гідротехнічних споруд / К. Р. Третяк, І. Р. Савчин. //

Збірник матеріалів XVII міжнародного науково-технічного симпозіуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS – технологій". – 2012. – №17. – С. 9 – 13.

7. Савчин І. Р. Дослідження надійності активних моніторингових геодезичних мереж / К. Р. Третяк, І. Р. Савчин. // Зб. пр. IV науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Наукова весна – 2013». – 2013. – №4. – С. 191 – 194.

8. Савчин І. Р. Розроблення методики розрахунку надійності активних моніторингових геодезичних мереж гідротехнічних споруд / К. Р. Третяк, І. Р. Савчин. // Збірник матеріалів XVIII міжнародного науково-технічного симпозіуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS – технологій". – 2013. – №18. – С. 234 – 237.

АНОТАЦІЯ

Савчин І.Р. Оптимізація активних геодезичних мереж моніторингу інженерних споруд гідроелектростанцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

У дисертаційній роботі на основі методів математичного моделювання встановлено залежність надійності від геометричної форми та схеми вимірювань в активних геодезичних мережах моніторингу (АГММ). На основі встановлених залежностей розроблено теоретичні засади та методику апріорного оцінювання надійності планових і просторових АГММ. Теоретично обґрунтовано та розроблено методику апостеріорної оптимізації АГММ із використанням параметрів точності та надійності. Розроблено проекти АГММ Усть-Каменогорської та Шульбінської ГЕС (Республіка Казахстан) і виконано апріорне оцінювання їхньої надійності. Проведено апріорне та апостеріорне оцінювання надійності, а також апостеріорну оптимізацію діючих АГММ Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС із використанням параметрів точності та надійності.

Ключові слова: надійність, активні геодезичні мережі моніторингу, апостеріорна оптимізація, математичне моделювання, моніторинг.

АННОТАЦИЯ

Савчин И.Р. Оптимизация активных геодезических сетей мониторинга инженерных сооружений гидроэлектростанций. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 – геодезия, фотограмметрия и картография. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

В диссертационной работе на основе методов математического моделирования установлена зависимость надежности от геометрической формы и схемы измерений в активных геодезических сетях мониторинга (АГСМ). На основе установленных зависимостей разработаны теоретические основы и методику априорной оценки

надежности плановых и пространственных АГСМ. Теоретически обосновано и разработано методику апостериорной оптимизации АГСМ с использованием параметров точности и надежности. Разработаны проекты АГСМ Усть-Каменогорской и Шульбинской ГЭС (Республика Казахстан) и выполнено априорную оценку их надежности. Проведено априорную и апостериорную оценку надежности, а также апостериорную оптимизацию действующих АГСМ Днепровской, Днестровской-1 и Каневской ГЭС с использованием параметров точности и надежности.

Ключевые слова: надежность, активные геодезические сети мониторинга, апостериорная оптимизация, математическое моделирование, мониторинг.

ANNOTATION

Savchyn I. Optimization of active geodetic monitoring networks of engineering structures of hydropower plants. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences by specialty 05.24.01 – geodesy, photogrammetry and cartography. – Lviv Polytechnic National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

Based on the analysis of the scientific literature found that due to the influence of random factors that lead to the appearance of errors that exceed the general background of all errors, processing results of measurements performed in the active geodetic monitoring networks (AGMN), are not always reliable. Analysis of the methods and technologies of screening measurements distorted by the influence of such errors was executed.

In the thesis on the basis of mathematical modeling the dependence reliability of geometric shapes and measurement scheme of AGMN was established. On the basis of the established dependency developed theoretical principles and methodology of priori estimation of reliability of spatial and plan AGMN. It was established that the accuracy of reliability estimation using this technique is 0.1–0.6%.

Theoretically grounded and developed the methodology of posteriori optimization of AGMN using parameters of accuracy and reliability. It is proved that the methodology makes it possible to improve the accuracy of 1.5–2.8 times of processing results and only of 2.0–7.0% deteriorate the reliability of AGMN. It is confirmed that this methodology makes it possible in real time to determine a set of vectors that need to remove from the process of elaboration and can be used for optimization of AGMN with different instrumental support (GNSS receivers, robotic total stations, electronic levels, inclinometers, etc.).

Was developed a projects of AGMN of Ust-Kamenogorsk and Shulbysk HPPs (Republic of Kazakhstan) and made a priori estimation of their reliability. Was conducted a priori and a posteriori estimation of reliability of existing AGMN of Dnipro, Dnister-1 and Kaniv HPPs. It was established that the real value of reliability of these AGMN are within determined priori values. Accomplished optimization of these networks using the proposed methodology of posteriori optimization which made it possible to increase the accuracy of processing results at AGMN and practically does not worsen reliability.

Keywords: reliability, active geodetic monitoring networks, posteriori optimization, mathematical modeling, monitoring.