

І.Ю. Черепанська, к.т.н., доц.
О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.
А.Ю. Сазонов, к.т.н.

Житомирський державний технологічний університет

ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КУТОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ГОНІОМЕТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Розглянуті систематична і випадкова складові похибки вимірювання гоніометричними системами, що використовуються для безконтактного вимірювання кутів у різних галузях науки та техніки, зокрема автоматизованої високоточної гоніометричної системи, яка знаходиться на стадії розробки. Особливий акцент зроблено на систематичну похибку, яка є найбільш прогнозованою і може бути компенсована. Авторами вказано, що випадкова складова похибки, на відміну від систематичної, принципово не може бути усунена, що обумовлюється загальним впливом на прилад і об'єкт вимірювання багатьох випадкових не пов'язаних між собою факторів, сумарний вплив яких створює відхилення, що безперервно випадково змінюються як за величиною, так і за знаком, тому оцінку випадкової складової похибки вимірювання необхідно проводити методами теорії ймовірності та математичної статистики за результатами багаторазових спостережень, які в даній роботі не наводяться. Систематична похибка розроблюваної автоматизованої високоточної гоніометричної системи, за результатами попереднього аналізу джерел її виникнення, представлена сукупністю відповідних компонентів. Це представлення є доцільним, оскільки дозволяє забезпечити її мінімізацію шляхом розробки і формування відповідних вимог і заходів.

Ключові слова: *автоматизована високоточна гоніометрична система; гоніометри; вимірювання кутів; автоматизація вимірювання; похибки вимірювання; систематична складова похибки вимірювання; випадкова складова похибки вимірювання.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасний розвиток власного машино- та приладобудівного виробництва, а також велика кількість інших науково-господарських завдань обумовлюють необхідність суттєвого вдосконалення процесів безконтактних куткових вимірювань, зокрема підвищення їх точності. Як відомо, наразі більшість вітчизняних лабораторій та підприємств України використовують технічно застарілі візуальні гоніометричні системи з невисокою, порівняно із імпортними системами, точністю, похибка яких складає соті частки кутової секунди. Це може бути обумовлено високою вартістю більш сучасних високоточних кутвимірювальних (гоніометричних) систем та комплексів особливо імпортного виробництва. Саме тому для України надзвичайно важливим та актуальним є завдання підвищення точності куткових вимірювань шляхом удосконалення існуючих або розробки нових перспективних гоніометричних систем (ГС), а також розвитку методичної складової метрологічних процедур куткових вимірювань. Останнє пов'язано із дослідженням метрологічних похибок та розробкою методів їх зменшення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що завдання підвищення точності ГС, побудованих на основі гоніометрів, сьогодні виділилася в окремий актуальний напрямок досліджень, що знайшло своє відображення у публікаціях переважно закордонних науковців [1–5, 7, 11]. Зокрема в [1] для визначення величини систематичної похибки ГС для контролю точнісних параметрів перетворювачів кута при складному законі руху ротора перетворювача в широкому діапазоні куткових швидкостей застосовується метод крос-калібрування. Також дещо модифікований метод крос-калібрування застосовується у [7] для аналізу похибок ГС. У [5] компенсація систематичної похибки динамічного гоніометра з фотоелектричним перетворювачем кута також досягається шляхом попереднього калібрування. У [2] похибки перетворювачів кута з відповідним наближенням описується сумою гармонічних складових з різною кратністю аргументу. Наводяться результати експерименту щодо зниження похибки до рівня однієї кутової секунди. У [3] для зменшення систематичної похибки власне гоніометра ГС на базі кільцевого лазера та/або оптичного датчика кута використовується метод інтерференційного нуля-індикатора, а для визначення систематичної похибки автоколіматора застосовується метод, заснований на процедурі

відносних розворотів. У [4] для компенсації інструментальних похибок як складових систематичної похибки автоматизованої лазерної ГС для контролю прецизійних засобів вимірювання кутових параметрів руху застосовується цифровий спосіб корекції фазоімпульсних електроприводів. У [11] для підвищення точності виконано аналіз складових похибки вимірювання оптико-електронних систем вимірювання.

З врахуванням наведеного очевидно, що дослідження, вдосконалення відомих та розробка нових ГС, а також підвищення їх точності є актуальною проблемою. При цьому відсутні загальні вказівки, методи та підходи щодо зменшення величини систематичної похибки цих систем. Це підкреслює те, що визначення та виключення систематичної похибки розроблюваних та використовуваних на виробництві ГС є складним завданням, яке вимагає сукупного, глибокого та всебічного аналізу методів та умов вимірювання, складових елементів ГС, а також індивідуальних підходів у кожному окремому випадку.

На сьогоднішній день однією із перспективних розробок для кутових вимірювань, наприклад у машино- та приладобудуванні України, є розроблений авторами технологічний комплекс для високоточного вимірювання кутів з автоматизованою обробкою даних в режимі реального часу або так звана автоматизована високоточна гоніометрична система (АВГС), похибки якої необхідно дослідити [10].

Формулювання мети статті. Постановка завдання. Тому метою статті є проведення аналізу складових та причин виникнення систематичної похибки вимірювання пропонованої АВГС. Вказане дозволить розробити заходи щодо зменшення похибки та, як результат, підвищити точність вимірювання.

Викладення основного матеріалу. Взагалі похибки сучасних ГС, в тому числі пропонованої АВГС, структура якої наведена на рисунку 1, підпорядковані складним залежностям та повністю не вивчені, і можуть бути виявлені лише в наслідок відповідних досліджень. Проте в цілому можна стверджувати, що похибка вимірювання, наприклад, для ГС ГС1Л [8, 9], що розроблена та досліджувана в ЦКБ „Арсенал” та на кафедрі приладобудування НТУУ „КПІ” має дві складові – *систематичну* та *випадкову* (рис. 2).

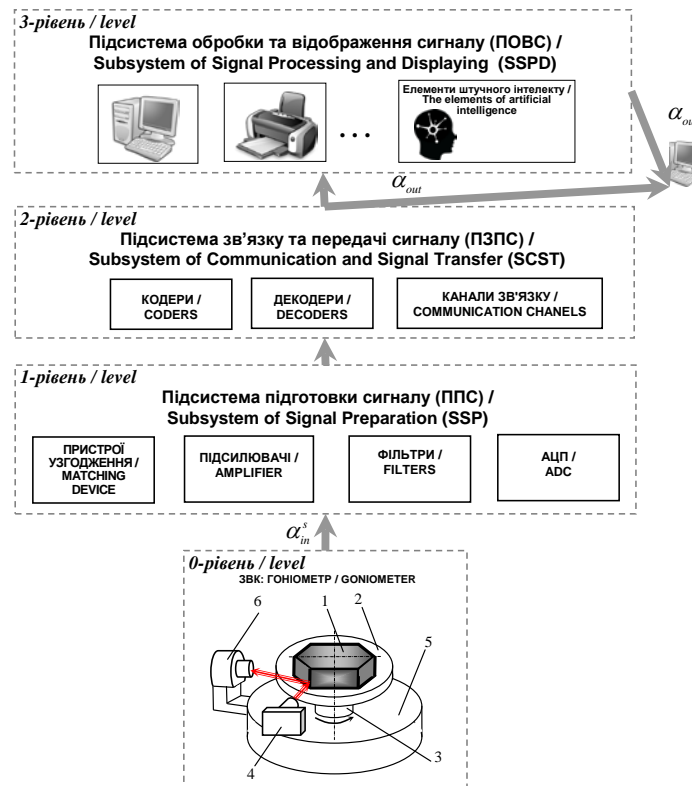


Рис. 1. Схема технологічного комплексу для високоточного вимірювання кутів з автоматизованою обробкою даних в режимі реального часу на основі гоніометра:

- 1 – об'єкт вимірювання; 2 – предметний стіл; 3 – поворотний пристрій;
4 – кільцевий лазер; 5 – привод обертання; 6 – автоколіматор [11]

У цілому похибка гоніометра при його атестації за ГОСТом 8.266-77 визначається двома методами: методом звірення з зразковими багатограними призмами і методом калібрування за допомогою кутових мір або багатограних призм. При цьому очевидним є відмінність результатів вимірювань при проведенні багаторазових експериментів. Причинами цього є: недосконалість засобів вимірювання, або так звана *інструментальна похибка* Δ_I ; недосконалість методу вимірювання, або так звана *методична похибка* Δ_M ; недостатність кваліфікації та / або ретельності роботи експериментатора, тобто так звана *суб'єктивна похибка* Δ_S . Комплексне врахування цих факторів дозволяє представити систематичну складову $\Delta_{y\Sigma}$ похибки вимірювання АВГС наступним чином:

$$\Delta_{y\Sigma} = f(\Delta_I; \Delta_M; \Delta_S), \quad (2)$$

де $\Delta_{y\Sigma}$ – сумарна систематична похибка АВГС; Δ_I – інструментальна похибка; Δ_M – методична похибка повірки гоніометра; Δ_S – суб'єктивна похибка оператора.

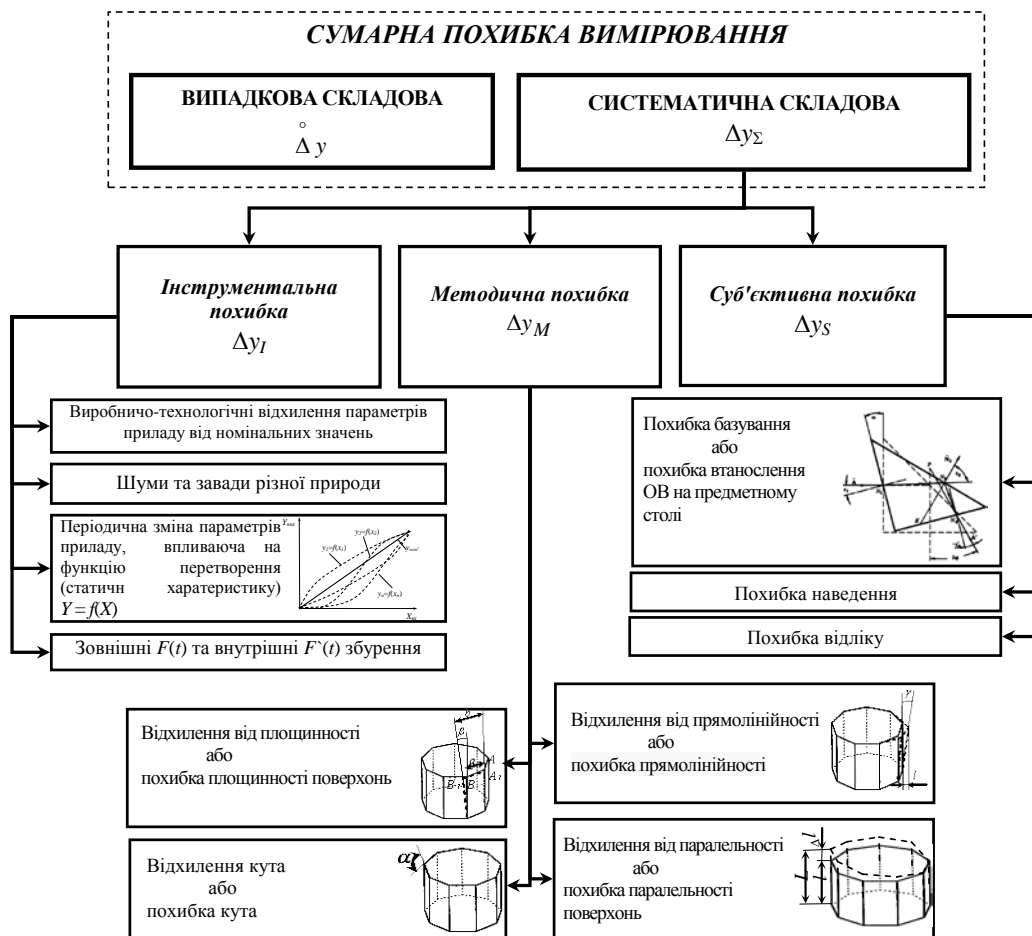


Рис. 2. Складові похибки вимірювання ГС

1. *Інструментальна похибка* Δ_I обумовлюється недосконалістю технологічного процесу виготовлення приладу, експлуатаційною зміною параметрів та характеристик конструкційних матеріалів і складових елементів системи, впливом зовнішніх та внутрішніх збурень (наприклад, електромагнітних полів, температури, вологи, нестабільністю напруги живлення тощо), що призводить до періодичної зміни параметрів системи в цілому і впливає на її функцію перетворення $Y(t) = f(X(t))$ (рис. 3).

Інструментальна похибка Δ_I може виникати через множину різних причини та відповідно мати множину різних складових.

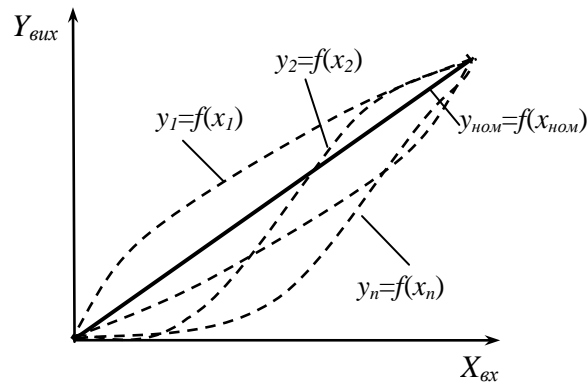


Рис. 3. Графічна форма представлення функції перетворення

1.1. *Виробничо-технологічні відхилення метрологічних параметрів A_i приладу від номінальних значень*, що виникають внаслідок похибок виготовлення деталей, конструкцій, вузлів ГС і обумовлюється частковими похибками окремих складових елементів $\Delta_I = f(\Delta_{j_i} | j = \overline{1, J})$, де j – складові елементи АВГС, як складної багаторівневої вимірювальної системи, що містить первинні перетворювачі, пристрої перетворення та обробки інформації, пристрої зв'язку або передачі інформації, пристрої зберігання та відображення інформації.

В свою чергу, відхилення метрологічних параметрів A_m приладу залежать від множини виробничо-технологічних параметрів q_k технології Q виготовлення j -их складових та системи в цілому: $A_i = f(Q)$, $m = \overline{1, M}$; $Q \supset \{q_k\}$, $k = \overline{1, K}$ та обумовлюються наступним:

1) неідентичністю технологічних процесів і первинних компонентів, що використовуються при виробництві матеріалів для деталей і вузлів, що призводить до розкиду фізичних параметрів, які характеризують властивості цих матеріалів (густина, масової частки електричного опору, концентрації домішок в напівпровідниках, показника заломлення оптичних елементів тощо) [6];

2) недосконалістю технологічних процесів і точністю технологічного обладнання, яке застосовується при виготовленні деталей і елементів приладів, що викликає відхилення геометричних форм та розмірів деталей і елементів [6];

3) недосконалістю складальних, регульовальних і контрольних пристроїв і технологічних операцій, що обумовлює похибки вузлів і приладів при їх складанні, юстируванні, регулюванні [6].

В наслідок відхилення параметрів приладу від номінальних значень через виробничо-технологічні відхилення процесів виробництва, істинна функція перетворення відрізняється від номінальної, тому виникає так звана виробничо-технологічна похибка $\Delta y_{\text{вТ}}$, що може бути визначена за виразом запропонованим в літературі [6] наступним чином:

$$\Delta y_{\text{вТ}} = \sum_{k=1}^K \left(\frac{dy_{\text{вТ}}}{dy_{k \text{ вТ}}} \right) \Delta y_{k \text{ вТ}} = \sum_{k=1}^K B_k \Delta y_{k \text{ вТ}}, \quad (3)$$

де $\Delta y_{\text{вТ}}$ – похибка внаслідок виробничо-технологічних відхилень процесу виробництва;

$B_k = \left(\frac{dy_{\text{вТ}}}{dy_{k \text{ вТ}}} \right)$ – коефіцієнти впливу, що обчислюються при номінальних значеннях q_k -го

виробничо-технологічного параметру приладу; $\Delta y_{k \text{ вТ}}$ – первинна похибка параметру q_k ,

$$\Delta y_{k \text{ вТ}} = (y_k - y_{k0}).$$

1.2. *Шуми та завади різної природи*, що призводять до появи похибок інформаційних сигналів приладу. Їх причинами можуть бути:

1) помилки або шум квантування вихідного сигналу $\Delta y_{\text{ш}}^k$, що виникають при його оцифруванні (наприклад, внаслідок округлення до певного розряду або відкидання молодших розрядів сигналу);

2) внутрішні шуми елементів електронних схем $\Delta y_{\text{ш}}^e$ (наприклад, шуми приймачів оптичного випромінювання, опорів, активних елементів: транзисторів, мікросхем тощо) [6];

- 3) паразитні ємнісні та індуктивні зв'язки $\Delta y_{ш}^{CL}$ [6];
- 4) опори витікання $\Delta y_{ш}^r$ (наприклад, по поверхні скла колби фотоелемента тощо) [6];
- 5) паразитні термо-ЕРС $\Delta y_{ш}^{tE}$, що виникають у точках з'єднання різнорідних провідників [6];
- 6) фотонний шум $\Delta y_{ш}^{\Phi}$ [6].

Внаслідок цього виникає так звана похибка шуму $\Delta y_{ш}$, що може бути визначена за виразом:

$$\Delta y_{ш} = \sum \Delta y_{ш}^x, \quad (4)$$

де $\Delta y_{ш}$ – похибка шуму; $\Delta y_{ш}^x$ – первинні складові похибки шуму; $x \in \{k, e, CL, r, tE, \Phi\}$ – скорочене умовне позначення шуму квантування, шуму елементів електронних схем, паразитних ємнісних і індуктивних зв'язків, опору витікання, паразитних термо-ЕРС, фотонного шуму відповідно.

1.3. Зовнішні $F(t)$ та внутрішні $F'(t)$ збурення, обумовлюють виникнення так званої похибки збурення $\Delta y_{F,F'}$.

До зовнішніх збурень $F(t)$, що діють на гоніометр, можна віднести зовнішні динамічні впливи, наприклад, мікровібрації, струси та ін., що викликають кутові коливання основи гоніометра та визначають тенденцію зміни кута положення основи гоніометра, також до зовнішніх збурень можна віднести впливи електричних та магнітних полів тощо.

До внутрішніх збурень $F'(t)$ можна віднести тертя в опорах, напрямних та шарнірних з'єднаннях рухомих частин вимірювальної системи, їх невірноваженість, сили та моменти, що виникають при взаємодії рухомої системи з внутрішніми магнітними та електричними полями [6].

Крім того, величина інструментальної похибки при проходженні сигналу через вимірювальний канал з відповідною передавальною функцією $f(x)$ (функцією перетворення) може збільшуватись або зменшуватись залежно від коефіцієнтів чутливості $K_{x_j} | j = \overline{1, J}$, j -их елементів гоніометра до факторів впливу, що були розглянуті вище: $K_{x_j} = \frac{df(x_j)}{dx_j}$, де x_j – вхідний сигнал деякого j -го елементу АВГС.

В результаті інструментальна похибка може бути представлена таким виразом:

$$\Delta y_I = \Delta y_{BT} + \Delta y_{ш} + \Delta y_{F,F'}, \quad (5)$$

де Δy_I – інструментальна похибка; Δy_{BT} – виробничо-технологічна похибка; $\Delta y_{ш}$ – похибка шуму; $\Delta y_{F,F'}$ – похибка збурення.

2. *Методична похибка* Δy_M в загальному випадку є складовою систематичної похибки вимірювань, яка обумовлена недосконалістю прийнятого методу вимірювання [6].

В даному випадку методична похибка Δy_M може бути обумовлена похибкою використовуваного методу повірки та градуювання власне гоніометра при застосуванні зразкових засобів вимірювання, наприклад, багатогранних призм, тобто в цілому обумовлена *параметрами об'єкта вимірювання*, зокрема:

1) неточними геометричними формами та розмірами: відхиленням від прямолінійності Δy_M^P (рис. 4, а), відхиленням від площинності Δy_M^{Pl} (рис. 4, б), відхиленням від паралельності Δy_M^{Pr} поверхонь (рис. 4, в), відхиленням кута Δy_M^{Rot} (рис. 4, з).

В такому випадку методична похибка Δy_M може бути описана виразом:

$$\Delta y_M = \sum \Delta y_M^k, \quad (6)$$

де Δy_M – методична похибка; Δy_M^k – первинні складові методичної похибки; $k \in \{P, Pl, Pr, Rot\}$ – скорочене умовне позначення відхилення від прямолінійності, відхилення від площинності, відхилення від паралельності поверхонь, відхилення кута відповідно.

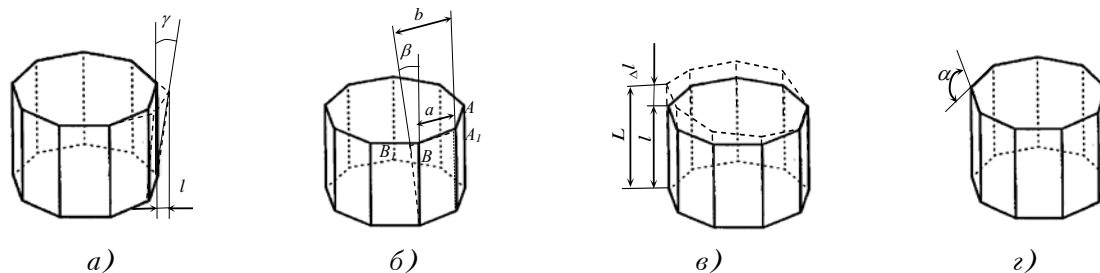


Рис. 4. Види відхилень геометричної форми та розмірів об'єктів вимірювання

3. Суб'єктивна похибка Δy_S або похибка оператора залежить від ретельності роботи та кваліфікації особи, що проводить вимірювання та може бути обумовлена:

- 1) неточністю або похибкою базування Δy_S^δ контрольованого об'єкта вимірювання, наприклад, багатогранної призми на предметному столі приладу (рис. 5);
- 2) похибкою наведення Δy_S^n ;
- 3) похибкою відліку Δy_S^v .

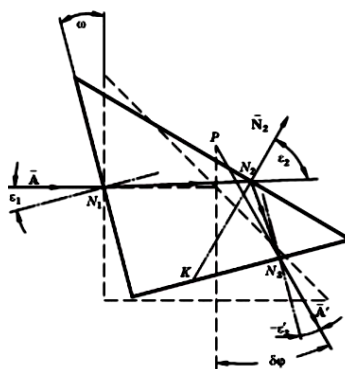


Рис. 5. Похибка базування

Внаслідок цього виникає суб'єктивна похибка Δy_S , що може бути визначена таким чином:

$$\Delta y_S = \sum \Delta y_S^j, \quad (7)$$

де Δy_S – суб'єктивна похибка; Δy_S^j – первинні складові суб'єктивної похибки; $j \in \{\delta, n, v\}$ – скорочене умовне позначення похибки базування, похибки наведення та похибки відліку відповідно.

Таким чином, в загальному випадку систематичну складову Δy_Σ похибки вимірювання ГС можна представити виразом:

$$\Delta y_\Sigma = \Delta y_I + \Delta y_M + \Delta y_S = (\Delta y_{BT} + \Delta y_{Ш} + \Delta y_{F,F'}) + (\sum \Delta y_M^k) + (\sum \Delta y_S^j), \quad (8)$$

де Δy_Σ – сумарна систематична похибка ГС; Δy_I – інструментальна похибка; Δy_M – методична похибка перевірки гоніометра; Δy_S – суб'єктивна похибка оператора; Δy_{BT} – виробничо-технологічна похибка; $\Delta y_{Ш}$ – похибка шуму; $\Delta y_{F,F'}$ – похибка збурення; Δy_M^k – первинні складові методичної похибки; $k \in \{P, Pl, Pr, Rot\}$ – скорочене умовне позначення відхилення від прямолінійності, відхилення від площинності, відхилення від паралельності поверхонь, відхилення кута відповідно; Δy_S^j – первинні складові суб'єктивної похибки; $j \in \{\delta, n, v\}$ – скорочене умовне позначення похибки базування, похибки наведення та похибки відліку відповідно.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У підсумку можна стверджувати, що представлення систематичної складової Δy_Σ похибки вимірювання ГС як сукупності вищевказаних складових за (8) доцільно з практичної точки зору. Очевидно, що в такому

випадку виникає можливість мінімізації систематичної складової шляхом розробки та формування в подальшому відповідних вимог і заходів щодо зменшення її інструментальної, методичної та суб'єктивної складових. Зокрема зменшення інструментальної похибки розроблюваної АВГС можна досягти за рахунок розробки в подальшому відповідних методик для обґрунтованого вибору елементів вимірювальних та інформаційних каналів системи, методичної – розробкою нових і застосуванням відомих відповідних сучасних методів обробки вимірювальної інформації, підвищенням точності виготовлення контрольованого об'єкта вимірювання тощо. Так, наприклад, відхилення від площинності граней багатогранної призми може бути досягнуто за рахунок застосування методу калібрування як при атестації призми, так і при атестації приладу. Метод калібрування дозволяє значно зменшити методичну складову похибки, тому, що вона буде однаково вноситися як при визначенні кутів призми, так і при оцінці похибки приладу. Крім того, вплив суб'єктивної складової, що обумовлюється похибкою базування контрольованих об'єктів вимірювання на предметному столі приладу, похибкою наведення і похибкою відліку, які тісно пов'язані з фізіологічними особливостями оператора, можна мінімізувати або навіть виключити в цілому за рахунок автоматизації процесу вимірювання та обробки вимірювальної інформації.

Крім того, в подальшому необхідною є оцінка випадкової Δu складової похибки вимірювання, яка може бути здійснена лише за результатами обмеженої кількості багаторазових спостережень, тому що, на відміну від систематичної $\Sigma \Delta$ складової похибки вимірювання, яка завжди може бути виключена, скомпенсована або врахована, випадкова складова принципово не може бути усунена. Це обумовлюється тим, що випадкові похибки виникають в наслідок загального впливу на прилад і об'єкт вимірювання багатьох випадкових не зв'язаних між собою факторів. Сумарний вплив цих факторів створює значні, помітні відхилення, що безперервно випадково змінюються як за величиною, так і за знаком. У такому випадку оцінка значення вимірюваної величини і точність вимірювання проводиться методами теорії ймовірності та математичної статистики за результатами багаторазових спостережень. При цьому необхідно враховувати, що від правильного визначення кількості спостережень залежить точність і надійність результатів дослідження, обсяг дослідження, терміни, в які воно буде проведено, фінансові та інші організаційні витрати. Тому ще одним важливим завданням під час оцінки похибок вимірювання АВГС є обґрунтування та визначення необхідної кількості дослідів. Вказане визначає напрямки подальших досліджень.

Список використаної літератури:

1. Агапов М.Ю. Разработка и исследование гониометрических систем контроля преобразователей угла : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Михаил Юрьевич Агапов. – Санкт-Петербург, 2009. – 17 с.
2. Аксененко В.Д. Автоматическая коррекция погрешности датчиков угла / В.Д. Аксененко // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 6. – С. 2–7.
3. Барينوва Е.А. Разработка и исследование методов повышения точности гониометрических систем : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Елена Анатольевна Барينوва. – Санкт-Петербург, 2009. – 167 с.
4. Береза Б.В. Разработка и исследование лазерной гониометрической системы контроля средств измерений угловых параметров движения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.14 “Системы обработки информации и управления” / Борис Владленович Береза. – Санкт-Петербург, 1993. – 20 с.
5. Гончаров Н.В. Разработка и исследование динамического гониометра на основе фотоэлектрического преобразователя угла : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)” / Никита Викторович Гончаров. – Санкт-Петербург, 2005. – 125 с.
6. Кортаев В.В. Точность измерительных оптико-электронных приборов и систем : учеб. пособие / В.В. Кортаев. – Санкт-Петербург, 2011. – 42 с.

7. Павлов П.А. Разработка и исследование высокоточных лазерных гониометрических систем : дис. ... докт. техн. наук : 05.11.16 “Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)” / Петр Алексеевич Павлов. – Санкт-Петербург, 2008. – 280 с.
8. Система углоизмерительная GS1L. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Украина ; ЦКБ «Арсенал».
9. Углоизмерительная система GS1L. КП СПС Арсенал // Поставщики машин и оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ukraina.oborudunion.ru/i_store/item_1000014315/ugloizmeritelnaya-sistema-gs1l.html (станом на 10.10. 2015).
10. Автоматизований технологічний комплекс високоточного вимірювання кутів на базі гоніометра / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов, А. Лаврищев // Technological Complexes. – № 1/2 (12). – 2015. – С. 38–45.
11. Чжан Хань. Исследование оптико-электронных систем измерения параметров пространственной ориентации перемещаемых объектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.07 "Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы" / Чжан Хань. – СПб., 2004. – 120 с.

References:

1. Agarov, M.Yu. (2009), *Razrabotka i issledovanie goniometricheskikh sistem kontrolya preobrazovateley ugla: Author's abstract*, St. Petersburg, 17 p.
2. Aksenenko, V. D. (2003), “Avtomaticheskaya korrektsiya pogreshnosti datchikov ugla”, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, No. 6, pp. 2–7.
3. Barinova, E.A. (2009), *Razrabotka i issledovanie metodov povysheniya tochnosti goniometricheskikh sistem: dissertation*, St. Petersburg, 167 p.
4. Bereza, B.V. (1993), *Razrabotka i issledovanie lazernoy goniometricheskoy sistemy kontrolya sredstv izmereniy uglovykh parametrov dvizheniya: Author's abstract*, St, Petersburg, 20 p.
5. Goncharov, N.V. (2005), *Razrabotka i issledovanie dinamicheskogo goniometra na osnove fotoelektricheskogo preobrazovatelya ugla: dissertation*, St. Petersburg, 125 p.
6. Korotaev, V.V. (2011), *Tochnost' izmeritel'nykh optiko-elektronnykh priborov i sistem*, St. Petersburg, 42 p.
7. Pavlov, P.A. (2008), *Razrabotka i issledovanie vysokotochnykh lazernykh goniometricheskikh sistem: dissertation*, St. Petersburg, 280 p.
8. *Sistema ugloizmeritel'naya GS1L. Tekhnicheskoe opisaniye i instruktsiya po ekspluatatsii*, TsKB “Arsenal”, Kyiv.
9. “Ugloizmeritel'naya sistema GS1L”, available at: http://ukraina.oborudunion.ru/i_store/item_1000014315/ugloizmeritelnaya-sistema-gs1l.html
10. Cherepans'ka, I.Ju., Bezvesil'na, O.M., Sazonov, A.Ju. and Lavrishhev, A. (2015), “Avtomatyzovanyj tehnologichnyj kompleks vysokotochnogo vymirjuvannja kutiv na bazi goniometra”, *Technological Complexes*, No. 1/2 (12), pp. 38–45.
11. Chzhan, Kh. (2004), *Issledovanie optiko-elektronnykh sistem izmereniya parametrov prostranstvennoy orientatsii peremeshchaemykh ob"ektov: dissertation*, St. Petersburg, 120 p.

ЧЕРЕПАНСЬКА Ірина Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- технологічні вимірювання та прилади;
- штучний інтелект;
- інформаційно-комп'ютерні технології і системи;
- автоматизація технологічних процесів.

E-mail: cheri_ko@mail.ru

Тел: +380 99 433 81 85

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- технологічні вимірювання та прилади;
- інформаційно-комп'ютерні технології і системи;
- автоматизація технологічних процесів.

E-mail: bezvesilna@mail.ru

САЗОНОВ Артем Юрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- технологічні вимірювання та прилади;
- штучний інтелект;
- інформаційно-комп'ютерні технології і системи;
- автоматизація технологічних процесів.

E-mail: artyomsazonov@ztu.edu.ua

Стаття надійшла до редакції 06.05.2016