

УДК 531.383

О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України "КПІ"

АНАЛІЗ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КАЛІБРУВАННЯ

В статті представлений метод калібрування для автоматизованого гоніометра на основі лазерного гіроскопа. Цей метод дозволяє виключити грубі промахи при вимірюваннях, суб'єктивні помилки оператора, неточності виставки призми. Тим самим метод калібрування дозволить значно підвищити точність вимірювання кутів.

Застосування лазерних гіроскопів у кутовимірювальних приладах дозволяє підвищити точність, достовірність і відтворюваність вимірювань, значно зменшити час вимірювання, автоматизувати його процес.

Спрощена схема гоніометра на основі ЛГ представлена на рис. 1. На обертовому пристрої 1 встановлено предметний стіл 2, контрольована призма 3, кути якої підлягають вимірюванню, лазерний гіроскоп 4. Обертювий пристрій 1 обертається з постійною швидкістю за допомогою електродвигуна 5, який керується блоком електропривода 6.

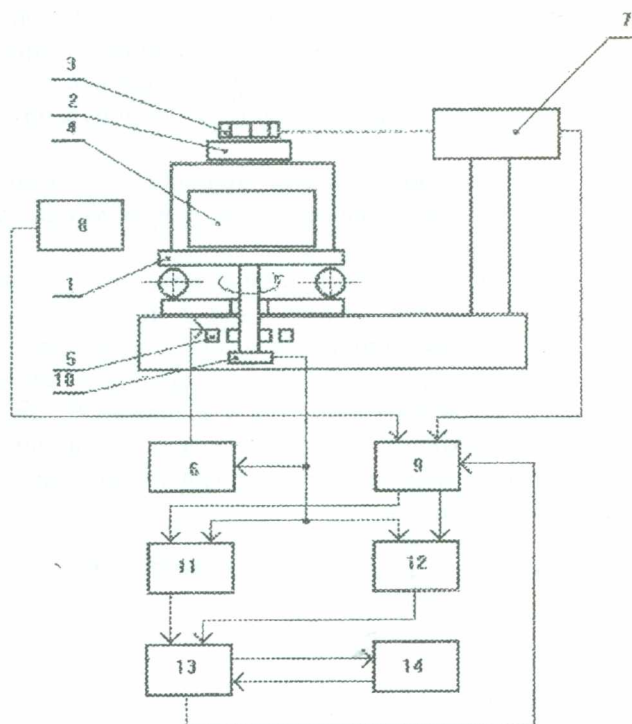


Рис. 1. Схема гоніометра на основі лазерного гіроскопа

Біля предметного столу 2 встановлено щілинний фотоелектричний автоколіматор 7. При обертанні обертового пристрою 1 з призмою 3 від кожної грані призми на виході автоколіматора 7 отримують електричні імпульси. Від блока прив'язки 8 базової грані отримують сигнал селекції першої грані призми, за допомогою якого блоком керування 9 виділяється імпульс автоколіматора від першої грані призми 3. Цей імпульс запускає лічильник імпульсів 11, який починає підраховувати число періодів сигналу ЛГ 4. Імпульсом автоколіматора 7 від наступної грані призми 3 лічильник 11 вимикається (зупиняється) і закінчує підрахунок числа періодів сигналу лазерного гіроскопа 4, а лічильник 12 починає підрахунок. Надходження імпульсу автоколіматора 7 від чергової грані призми 3 вмикає один лічильник і вимикає другий. Інформація з лічильників 11 і 12 за допомогою пристрою зв'язку 13 передається в ЕОМ 14. Таким чином, в ЕОМ за один повний оберт обертового пристрою 1 отримують числа:

$$\begin{aligned}
 & \text{З лічильника 11:} & \text{З лічильника 12:} \\
 N_1 &= \int_{t_1}^{t_2} f_{out}(t) dt, & N_2 &= \int_{t_2}^{t_3} f_{out}(t) dt, \\
 N_3 &= N_1 + \int_{t_3}^{t_4} f_{out}(t) dt, & N_4 &= N_2 + \int_{t_4}^{t_5} f_{out}(t) dt, \\
 N_{n-1} &= N_{n-3} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{out}(t) dt, & N_n &= N_{n-2} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f_{out}(t) dt,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де індекс при N – номер записаного числа;

$t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n+1}$ – час надходження імпульсів автоколіматора, що надходять від першої, другої тощо граней призми;

$f_{out}(t)$ – частота сигналу на виході ЛГ;

n – кількість граней контрольованої призми.

Виміряні кути при відліку кутів від базової грані обчислюються ЕОМ за формулою:

$$\begin{aligned}
 \varphi_i &= 2\pi \frac{N_{i-1} + N_i}{N_{n-1} + N_n} = 2\pi \frac{N_\varphi}{N_{2\pi}} \\
 N_{i-1} &= 0 \text{ при } i = 1,
 \end{aligned} \tag{2}$$

де i – номер вимірюваного кута.

Для зменшення похибки та збільшення точності вимірювання застосовуються багаторазові вимірювання. У приладі ГС1Л похибка вимірювання представлена у вигляді систематичної і випадкової складових. Це дозволяє оцінити зменшення похибки при збільшенні кількості приймань вимірювань. Згідно з технічними умовами, похибка вимірювання плоских кутів приладом ГС1Л за 17 прийомів (сума систематичної та випадкової складових) не перевищує 0,5". Використання різних методик, наприклад методу калібрування, дозволяє додатково підвищити точність вимірювань.

Метод калібрування дозволяє виключити грубі промахи при вимірюваннях, суб'єктивні помилки оператора, неточності виставки призми. Тим самим метод калібрування дозволяє значно підвищити точність вимірювання кутів.

Метод калібрування є ефективним засобом підвищення точності вимірювання кутів. За його допомогою стає можливим провести вимірювання з підвищеною точністю як плоских кутів контрольованої призми (міри), так і оцінити похибку гоніометра.

Сутність методу полягає у тому, що контрольовану призму встановлюють послідовно зі зсувом на її кутовий крок відносно лімба гоніометра у діапазоні $0 \dots 2\pi$, вимірюють в у будь-якому з положень кути призми і знаходять середнє значення однойменних кутів, виміряних у різних положеннях. Таким чином визначаються усереднені значення кутів, виміряних на різних ділянках лімба. При цьому одержують:

$$\int_0^\varphi f(\Delta\varphi) d\varphi + \int_\varphi^{2\varphi} f(\varphi) d\varphi + \dots + \int_{(n-1)\varphi}^{2\pi} f(\varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} f(\Delta\varphi) d\varphi = 0 \tag{3}$$

де φ – кутовий крок міри,

n – кількість перестановок призми,

$\Delta\varphi$ – функція похибки гоніометра.

З наведеного виразу видно, що систематична складова похибки при вимірюваннях одного і того ж кута на всіх ділянках лімба гоніометра в діапазоні $0 \dots 2\pi$ дорівнює нулю. Ця обставина дозволяє суттєво підвищити точність вимірювань.

Раніше цей метод застосовувався при унікальних кутовимірювальних роботах і дослідженнях, однак не отримав широкого розповсюдження через високу трудомісткість і низьку ймовірність вимірювань.

Наприклад при вимірюванні кутів 24-гранної призми методом калібрування за допомогою лімбового приладу ГС2 з візуальним наведенням і відліком необхідно провести вимірювання всіх кутів призми в 24 різних положеннях відносно лімба, що, з урахуванням прямого і зворотного ходів, складає 1152 відліків кутів. При цьому візуальні наведення і знімання інформації, ручний запис і обробка результатів різко знижує достовірність вимірювань.

Експериментально встановлено, що, незважаючи на жорсткий контроль, 26 % 70-гранних призм у серії з 50 призм, виміряних методом калібрування за допомогою приладу ГС2, мали окремі кути з недопустимими відхиленнями або грубими похибками при вимірюваннях.

Поява кутовимірювальних приладів з потужними обчислювальними засобами і повною автоматизацією процесу вимірювання і документування інформації знову привернула увагу до методу калібрування.

Ручною операцією у таких приладах залишається тільки встановлення призми. Всі інші операції виконуються автоматично. Це дозволило у десятки разів зменшити час вимірювання і значно підвищити достовірність вимірювань, що зробило можливим застосовувати метод калібрування не тільки при унікальних роботах, а й при рутинних вимірюваннях, наприклад у цехових умовах.

Застосування методу калібрування в автоматичних кутовимірювальних засобах має свої особливості.

Наприклад для того, щоб оперувати з невеликими цифрами, у методі калібрування стосовно лімбових гоніометрів вимірюються відхилення від номінальних значень кутів призми.

У автоматичних же кутовимірювальних приладах завдяки можливостям сучасних обчислювальних засобів усі операції здійснюються безпосередньо з вимірюваними кутами, а не їх відхиленнями від номіналу.

У стандарті [2], орієнтованому на використання лімбових гоніометрів, проводяться вимірювання відхилень від номіналу тільки суміжних центральних кутів. У автоматичних же гоніометрах можуть проводитися вимірювання як суміжних центральних кутів, так і кутів при відліку від базової (першої) грані.

Ці обставини призводять до того, що розроблені раніше алгоритми вимагають корекції при їх використанні в автоматичних кутовимірювальних засобах.

І нарешті, автоматичне знімання інформації та її обробка за допомогою ЕОМ відкривають додаткові можливості щодо підвищення точності й контролю достовірності вимірювань, а також для вимірювання об'єктів, які раніше не вимірювалися із застосуванням методу калібрування.

Застосування методу калібрування в цехових умовах різко розширює асортимент контрольованих призм. Якщо для метрологічної мети застосовуються як правило багатогранні призми з рівномірним кутовим кроком, який вкладається цілим числом разів у кут 2π , то у виробництві часто зустрічаються призми, кут яких не вкладається у ціле число разів 2π , або призми з малим кутом між нормальми до граней, вимірювання яких із стичними кутовими інтервалами потребує більшої кількості перестановок.

Вимірювання призм з кутом, який не вкладається цілим числом разів у 2π , можуть бути виконані за одним з двох варіантів:

1. Вимірювання здійснюються при перестановці призми з кутовим кроком θ із стичним кутовим інтервалом $\theta = \varphi$ доти, доки грань призми не займе положення $2\pi n$, де n – кількість повних обертів, які здійснить призма до замикання.

У цьому випадку повинна здійснюватись умова:

$$2\pi n = \varphi m, \quad m = \frac{2\pi n}{\varphi}, \quad (4)$$

де m – кількість положень призми;

m, n – додатні цілі числа;

φ – вимірюваний кут.

У цьому випадку отримують:

$$\int_0^{n \cdot 2\pi} f(\Delta\varphi) d\Delta\varphi = 0. \quad (5)$$

Тобто систематична складова похибки гоніометра не буде впливати на точність вимірювання.

Наприклад при вимірюванні призми з центральним кутом $\varphi = 240^\circ$ повне здійснення умови (4) настає при $n = 2, m = 5$.

Це означає, що при перестановці призми з стичними кутовими інтервалами необхідно виконати 5 перестановок ($m = 5$). При цьому буде виконана умова (4) і призма при перестановках опише повне коло 2 рази ($n = 2$).

При $\varphi = 160^\circ$ отримують відповідно $n = 4, m = 5$.

2. Вимірювання проводять при перекриваючих кутових інтервалах ($\theta < \varphi$) таким чином, щоб як кутові інтервали, так і перекриття ціле число разів вкладались у кут 2π .

При цьому повинна виконуватись умова:

$$\frac{2\pi}{\varphi} = k,$$

де k – додатне ціле число.

Наприклад для призми з центральним кутом $\varphi = 240^\circ$ може бути прийнято $k = 2\pi/240^\circ$.

При вимірюванні малих кутів (наприклад кутових мір типу 1, 2, виконаних відповідно з використанням методу калібрування) необхідна більша кількість перестановок міри. У цьому випадку зміни доцільно проводити з пропусками кутових інтервалів ($\theta > \varphi$). Перед змінами необхідно дослідити систематичну складову похибки гоніометра, переконатися, що вона є плавною кривою, і обрати крок θ .

Описаний у [1], [2] метод калібрування розповсюджується на вимірювання суміжних центральних кутів призми. За допомогою автоматичних гоніометрів можуть бути виміряні як суміжні центральні кути, так і центральні кути при відліку від базової грані.

При вимірюванні суміжних кутів контрольовану багатогранну призму встановлюють на предметному столі гоніометра у перше положення і проводять вимірювання всіх її суміжних кутів $\alpha_{i,1}$, де перша цифра індексу – номер кута призми ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), друга – номер положення призми на предметному столі. Кути, вимірювані у цьому положенні, наведені у стовпчику 1 табл. 1.

Далі розвертають призму відносно осі обертання предметного стола гоніометра на її кутовий крок, виконують необхідні регулювання для досягнення максимальних значень ексцентриситету і нахилу, встановлюючи таким чином призму у друге положення. У другому положенні проводять вимірювання всіх суміжних кутів призми $\alpha_{i,2}$. Виміряні у цьому положенні кути наведені у стовпчику 2 табл. 1. У подальшому призму послідовно розвертають на її кутовий крок і в кожному положенні вимірюють всі її суміжні кути. Виміряні у кожному з наступних положень кути наведені у табл. 1 (положення 3, ..., n). Кількість положень **відповідає кількості граней призми. Таким чином, ті самі кути призми вимірюються на різних ділянках шкали (лімба) гоніометра.**

Після вимірювань обчислюють середнє значення однойменних кутів (що мають однаковий перший індекс), виміряних у всіх положеннях призми, тобто обчислюють середнє значення кожного рядка табл. 1:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_{k,i}}{n} = k, \tag{6}$$

де k – номер положення призми.

Таблиця 1

Суміжні кути контрольованої багатогранної призми

Номер кута	Номер положення				
	1	2	3	...	N
1	$\alpha_{1,1}$	$\alpha_{1,2}$	$\alpha_{1,3}$	...	$\alpha_{1,n}$
	$J_{1,1}$	$J_{1,2}$	$J_{1,3}$	...	$J_{1,n}$
2	$\alpha_{2,1}$	$\alpha_{2,2}$	$\alpha_{2,3}$	...	$\alpha_{2,n}$
	$J_{2,1}$	$J_{2,2}$	$J_{2,3}$	...	$J_{2,n}$
3	$\alpha_{3,1}$	$\alpha_{3,2}$	$\alpha_{3,3}$	...	$\alpha_{3,n}$
	$J_{3,1}$	$J_{3,2}$	$J_{3,3}$	...	$J_{3,n}$
...
n	$\alpha_{n,1}$	$\alpha_{n,2}$	$\alpha_{n,3}$	...	$\alpha_{n,n}$
	$J_{n,1}$	$J_{n,2}$	$J_{n,3}$	...	$J_{n,n}$

Одержані кути $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ контрольованої призми є більш точними порівняно з вимірюванням кутів призми в одному положенні.

Розглянемо складові кутів рядка 1 і стовпчика 1 табл. 1.

Кути, наведені у рядку 1 табл. 1, можуть бути подані у вигляді:

$$\begin{aligned} \alpha_{1,1} &= \alpha_{1,4} + \Delta_{1,1} + \sigma_{1,1} \\ \alpha_{1,2} &= \alpha_{1,4} + \Delta_{1,2} + \sigma_{1,2} \\ &\dots\dots\dots \\ \alpha_{1,n} &= \alpha_{1,4} + \Delta_{1,n} + \sigma_{1,n} \end{aligned} \tag{7}$$

де $\alpha_{1,n}$ – істинне значення першого кута;

$\Delta_{1,1}, \Delta_{1,2}, \dots, \Delta_{1,n}$ – систематична складова похибки вимірювання першого кута у першому, другому, ... n -ому положенні призми;

$\sigma_{1,1}, \sigma_{1,2}, \dots, \sigma_{1,n}$ – випадкова складова похибки вимірювання першого кута у першому, другому, ... n -ому положеннях призми.

Зазвичай багатогранні призми, призначені для метрологічної мети, виконуються з невеликими відхиленнями від номінального кутового кроку, тобто мають приблизно однакові кути між суміжними гранями.

З урахуванням цього стовпчик 1 табл. 1 (крім уже розглянутого у виразі (2) кута $\alpha_{1,1}$) може бути представлений у вигляді:

$$\begin{aligned} \alpha_{2,1} &= \alpha_{2,4} + \Delta_{2,1} + \sigma_{2,1} \\ \alpha_{3,1} &= \alpha_{3,4} + \Delta_{3,1} + \sigma_{3,1} \\ &\dots\dots\dots \\ \alpha_{n,1} &= \alpha_{n,4} + \Delta_{n,1} + \sigma_{n,1} \end{aligned} \tag{8}$$

де $\alpha_{2,n}, \alpha_{3,n}, \dots, \alpha_{n,n}$ – істинне значення другого, третього, ... n -го кутів призми;

$\sigma_{2,1}, \sigma_{3,1}, \dots, \sigma_{n,1}$ – випадкова складова похибки вимірювання другого, третього, ..., n -го кута у першому положенні.

При багатократних вимірюваннях у кожному з положень призми з точністю до невиключеної випадкової складової похибки можна записати:

$$\alpha_1 \cong \alpha_{1,u}; \alpha_2 \cong \alpha_{2,u}; \dots; \alpha_n \cong \alpha_{n,u} \tag{9}$$

З врахуванням цього обчислюють відхилення першого кута у різних положеннях призми (рядок 1 табл. 1):

$$\begin{aligned} \delta_{1,1} &= \alpha_{1,1} - \alpha_1 \cong \Delta_{1,1} + \sigma_{1,1} \\ \delta_{1,2} &= \alpha_{1,2} - \alpha_1 \cong \Delta_{1,2} + \sigma_{1,2} \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_{1,n} &= \alpha_{1,n} - \alpha_1 \cong \Delta_{1,n} + \sigma_{1,n} \end{aligned} \tag{10}$$

Крім того, обчислюють відхилення всіх кутів, отриманих у першому положенні призми (стовпчик 1 табл. 1), крім уже розглянутого у виразі (7) першого кута:

$$\begin{aligned} \delta_{2,1} &= \alpha_{2,1} - \alpha_2 \cong \Delta_{1,2} + \sigma_{2,1} \\ \delta_{3,1} &= \alpha_{3,1} - \alpha_3 \cong \Delta_{1,3} + \sigma_{3,1} \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_{n,1} &= \alpha_{n,1} - \alpha_n \cong \Delta_{1,n} + \sigma_{n,1} \end{aligned} \tag{11}$$

З наведеного видно, що при вимірюванні у першому положенні призми до істинного значення її кутів додається похибка гоніометра на відповідних ділянках його шкали.

З іншого боку, при вимірюваннях з послідовним розворотом на кутовий крок призми, до першого її кута повинні додаватися ті ж складові похибки гоніометра, що і при вимірюванні призми у першому положенні. Причому похибки повинні бути приблизно рівні для першого кута у другому положенні і другого кута у першому положенні, для першого кута у третьому положенні і третього кута призми у першому положенні тощо. Якщо вони суттєво відрізняються, це свідчить про недостовірні вимірювання.

Для оцінки достовірності вимірювань обчислюють різницю і порівнюють:

$$\begin{aligned} \delta_{2,1} - \delta_{1,2} &\cong \sigma_{2,1} - \sigma_{1,2} \leq \varepsilon \\ \delta_{3,1} - \delta_{1,3} &\cong \sigma_{3,1} - \sigma_{1,3} \leq \varepsilon \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_{n,1} - \delta_{1,n} &\cong \sigma_{n,1} - \sigma_{1,n} \leq \varepsilon \end{aligned} \tag{12}$$

де ε – допустиме відхилення при вимірюванні кутів.

У випадку, якщо при перестановках призми кут розвороту буде виконаний з недопустимим відхиленням від кутового кроку, різко зміниться похибка вимірювання, відбудеться грубий промах при вимірюваннях, призма буде мати недопустимий нахил або ексцентриситет, тоді одне або декілька нерівностей (12) будуть порушені. При цьому вимірювання повинні кваліфікуватися як недостовірні та їх необхідно повторити.

Величина ε може бути обчислена виходячи з допусків на неточність встановлення, кількості прийомів вимірювань, величини випадкової складової похибки вимірювань і т.ін.

У деяких випадках доцільно прийняти:

$$\varepsilon = a\sigma,$$

де a – коефіцієнт, що обирається з задач вимірювань, наприклад заданого рівня довірчої вірогідності;

σ – допустиме середнє квадратичне відхилення випадкової складової похибки вимірювання кутів.

Найбільш просто ε визначати експериментально для кожного конкретного приладу.

Наведені співвідношення справедливі при вимірюванні суміжних кутів призми.

У випадку відліку всіх кутів призми від базової грані у першому положенні призми (стовпчик 1) будуть наростаючі кути, а у рядку 1 буде перший кут, виміряний у різних положеннях відносно шкали гоніометра.

У цьому випадку обробка інформації відповідно виразам (3...8) проводиться однаково, однак вираз (12) повинен бути таким:

$$\begin{aligned} \delta_{2,1} - (\delta_{1,2} + \delta_{1,2}) &\leq \varepsilon \\ \delta_{3,1} - (\delta_{1,2} + \delta_{1,2} + \delta_{1,3}) &\leq \varepsilon \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_{n,1} - (\delta_{1,2} + \delta_{1,2} + \delta_{1,3} + \dots + \delta_{1,n}) &\leq \varepsilon \end{aligned} \tag{13}$$

Отже можна сказати, що метод калібрування ефективний для кутовимірювальних приладів, у яких цілком автоматизований процес вимірювання та обробки інформації. Він суттєво дозволяє зменшити похибку вимірювання кутів та підвищити точність вимірювань завдяки тому, що систематична складова похибки при вимірюваннях одного і того ж кута на всіх ділянках лімба гоніометра в діапазоні $0...2\pi$ дорівнює нулю.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Островский Г.Н., Дулов М.И., Драудин А.Т. Метод калибровки угломерных шкал и приборов с одновременной аттестацией. С. 8–10.
2. ГОСТ 8.266-77. Гониометры. Методы и средства поверки. – Изд-во стандартов, 1978. – С. 11–12.
3. Система углоизмерительная ГС1Л. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Украина. – ЦКБ «Арсенал».
4. Ванюрихин А.И., Зайцев И.И. Автоматизированный гониометр на основе кольцевого лазера // Оптико-механическая промышленность. – 1982. – № 9. – С. 28–31. (Soviet Journal of Optical Technology).

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна – доктор технічних наук, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- вимірювальні перетворювачі;
- гравіметрія;
- інформаційні системи.

Подано 17.02.2003