

**О.М Безвесільна, д.т.н., проф.**  
*Національний технічний університет України „КПІ”*  
**С.В. Кур’ята, магістрант.**  
*Житомирський державний технологічний університет*

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ І ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ГОНІОМЕТРА

*У статті розглянуті результати експериментального дослідження систематичних та випадкових похибок гоніометра. Проаналізовано зміни похибок в залежності від серії вимірювання та включення приладу.*

**Стан проблеми.** Кутовимірювальна система ГС1Л [1], розроблена та досліджувана в ЦКБ „Арсенал” та на кафедрі приладобудування НТУУ „КПІ”, – це перший прилад, у якому в якості кутової шкали застосовується лазерний гіроскоп (ЛГ) [1–12]. Використання ЛГ дозволило отримати якісно новий кутовимірювальний засіб, у якому повністю автоматизовано процес безпосереднього вимірювання кутів, значно зменшено час вимірювання і підвищена точність.

Даний прилад у автоматичному режимі дозволяє здійснювати вимірювання плоских кутів і пірамідальності призм, а також показника заломлення оптичного скла. Завдяки використанню розробленого ЛГ стало можливим по-новому розглядати проблему вимірювання кутів та форму представлення похибки.

У приладі ГС1Л похибка вимірювання представлена у вигляді систематичної та випадкової складових. Це дозволяє оцінити зменшення похибки при збільшенні кількості приймань вимірювань. Згідно технічним умовам, похибка вимірювання плоских кутів кутовимірювальною системою ГС1Л за 17 прийомів (сума систематичної і випадкової складових) не перевищує 0,5". Однак, прилади, які виробляють, мають більш низьку похибку. Однак, в літературі [1–6 та ін.] немає відомостей щодо експериментальних досліджень ГС1Л, якими було б підтверджено теоретичні значення похибок вимірювання.

**Мета статті** – викласти результати експериментальних досліджень кутовимірювальної системи ГС1Л.

У приладі ГС1Л у штатному режимі перша грань контрольованої призми встановлюється на предметному столі в однозначне положення. Здійснити вимірювання кутів при іншому положенні призми без застосування спеціальних переключень неможливо. Тому будь-який кут призми може бути виміряний або з максимальною додатною похибкою, або з максимальною від’ємною. Разом з тим, у приладі реалізована можливість проведення вимірювань у будь-якому положенні призми на предметному столі, що дає можливість проведення вимірювань методом калібрування. Такі вимірювання забезпечуються відповідними переключеннями приладу.

Зауважимо, що згідно [2], похибка лімбових гоніометрів представляється як сума по модулю найбільших додатного і від’ємного відхилень. У таких приладах можливий варіант, коли початок вимірювань попадає, наприклад, на максимальну за модулем від’ємну похибку, а закінчення – на максимальну додатну похибку лімба.

У приладі ГС1Л середнє квадратичне відхилення (СКВ) видається у протоколі вимірювань окремо для кожного кута. При більшій кількості граней призми одержують більшу кількість СКВ (наприклад, для 24-гранної призми – 24 значення СКВ). У такому випадку порівнювати СКВ декількох серій вимірювань складно. Тому у протоколі вимірювань дається параметр „Загальне СКВ”, який обчислюється з використанням СКВ для всіх кутів призми у даній серії і служить узагальненою характеристикою випадкової складової похибки цієї серії вимірювань.

Похибку вимірювання кутів багатогранних призм зручно розділити на три складові:

- похибка, яка вноситься в результат вимірювання самим приладом;
- похибка, обумовлена параметрами контрольованої багатогранної призми (плоскостістю і пірамідальністю граней, параметрами відбиваючого покриття та ін.);
- похибка, обумовлена неточністю встановлення контрольованої призми.

Таке представлення джерел похибки зручне для практики, тому що дозволяє виробити вимоги до похибки приладу, вимоги до точності виготовлення контрольованої призми і точності її встановлення на предметному столі приладу.

Дослідження системи ГС1Л були спрямовані на оцінювання величини і стабільності систематичної і випадкової складових похибки у режимі вимірювання плоских кутів. Всі дослідження проводились за допомогою кварцової зразкової 24-гранної призми, виготовленої за класом "0" згідно вимогам стандарту. Відлік кутів проводився від першої до всіх інших граней. Це дає можливість оцінити накопичену похибку по всьому діапазону вимірювання кутів. Дослідження проводились на серійному приладі ГС1Л. Визначались короткочасна і довгочасна стабільність як систематичної, так і випадкової складових похибки.

Короткочасна стабільність похибки визначалась при безперервному вимірюванні впродовж робочого дня (8 годин) і представляє особливий інтерес для вимірювань методом калібрування.

Довгочасна стабільність визначалась від включення до включення впродовж трьох місяців. Вона представляє особливий інтерес для випадку, коли оцінюється систематична складова похибки, а потім, з метою підвищення точності, вносяться поправки в результат вимірювання.

Короткочасна стабільність оцінювалась наступним чином. Зразкова призма встановлювалась на предметному столі приладу. У такому положенні проводились вимірювання всіх кутів призми 50 прийомами. Відлік кутів проводився від базової грані. Виміряні кути  $\varphi_i$  запам'ятовувалися ЕОМ.

Потім проводились вимірювання всіх кутів ( $\varphi_i$  призми безперервно протягом 8 годин 3 дні підряд. Для кожної серії проводились обчислення

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i0}. \quad (1)$$

За час цієї серії експериментів призма не знімалась з предметного столу і залишалась в одному і тому ж положенні. Таким чином виключалась складова похибки, що визначається неточністю встановлення призми.

У всіх вимірюваннях у систематичній складовій похибки присутня невиключена випадкова складова, яка не перевищує  $0,02''$ .

На рис. 1 наведені графіки різниці результатів вимірювань, проведених протягом дня. Крива 1 – різниця між двома послідовними серіями, крива 2 – різниця між серіями, проведеними на початку вимірювань через 4 години, крива 3 – різниця між вимірюваннями, проведеними на початку і в кінці дня (через 7 годин).

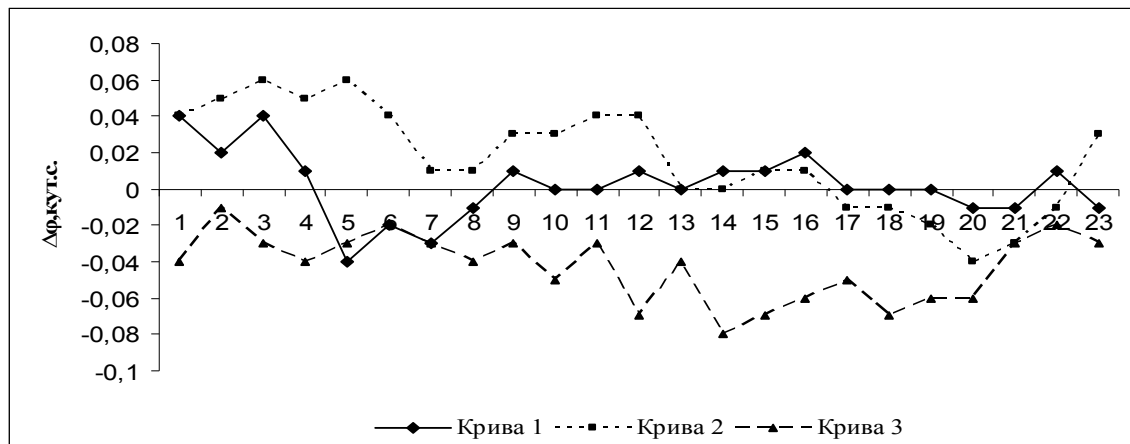


Рис 1. Графіки різниці результатів вимірювань систематичної складової похибки, проведених протягом дня

Дослідження показали, що зміни протягом дня систематичної складової похибки можуть бути представлені, як однаковий для всіх кутів випадковий за величиною зсув, на який накладаються випадкові зміни.

При цьому відхилення від серії до серії при одному включенні не перевищують: постійне відхилення  $\pm 0,04''$ , максимальне відхилення кривої, що накладається на постійне відхилення  $\pm 0,04''$ .

На рис. 2 наведені стандартні СКВ випадкової складової похибки кожного з контрольованих кутів призми, які отримані одночасно з вимірюваннями, наведеними на рис. 1.

Крива СКВ може бути представлена прямою на центральній ділянці величиною  $0,14''$  зі зменшенням на початку і в кінці вимірювань. Для кількості прийомів вимірювань  $N = 50$  точність визначення  $\sigma$  складає близько 10% [3], тобто приблизно  $0,014''$ .

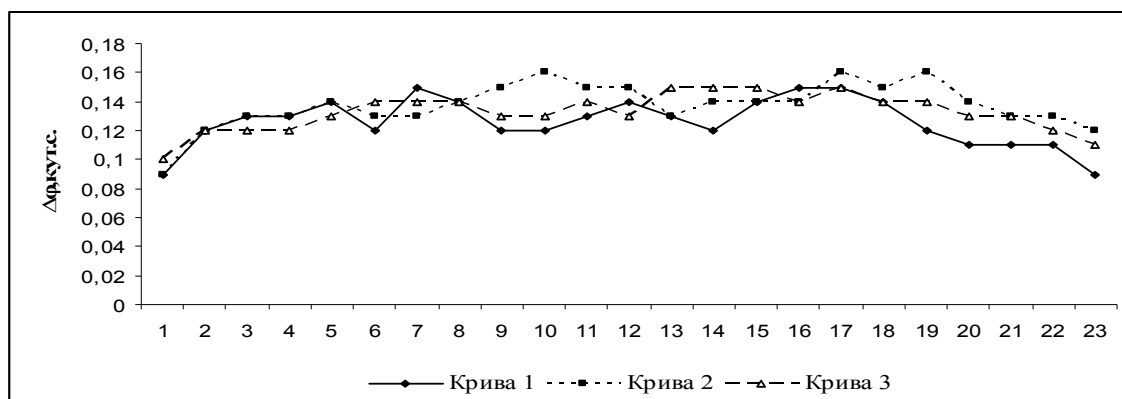


Рис. 2. Середні квадратичні відхилення випадкової складової похибки

На центральній ділянці деякі значення СКВ перевищують вказаний допуск, що може бути пояснено заокругленням результатів. Однак при всіх вимірюваннях відхилення на першому і останньому кутах досягають 30%. Ці відхилення поки що не мають пояснення.

Довгочасна стабільність оцінювалась за тією ж методикою, що і короткочасна, з тією різницею, що призма при кожному вимірюванні заново встановлювалась на предметному столі приладу.

На рис. 3 наведені графіки різниці вимірювань, отриманих з інтервалом у тиждень (крива 1) та місяць (крива 2).

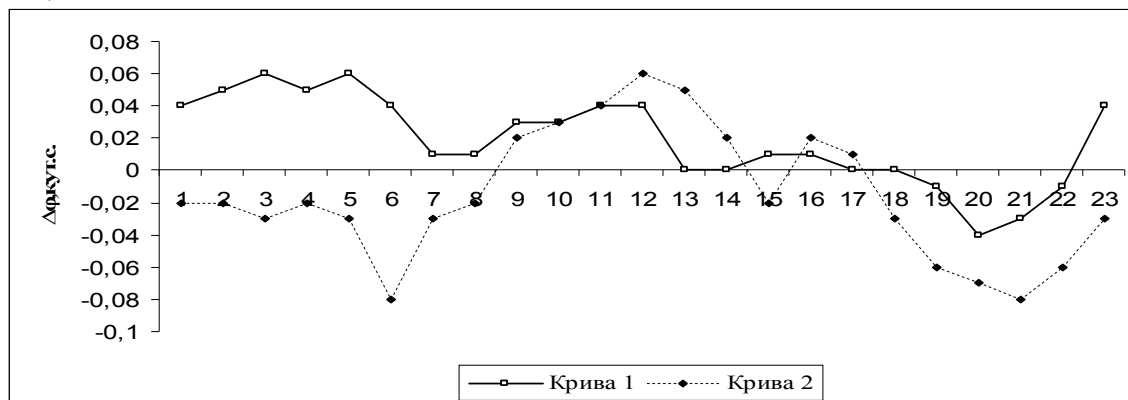


Рис. 3. Графіки різниці вимірювань довгочасної стабільності систематичної складової похибки

Зміни систематичної складової похибки можуть бути представлені як постійне відхилення з випадковою величиною, на яку накладається періодична крива. При цьому: постійна складова знаходиться в межах  $\pm 0,06''$ ; максимальне відхилення кривої, яка накладається на постійну складову –:  $\pm 0,07''$ .

Зміна систематичної складової похибки у всіх умовах експлуатації не перевищувала  $\pm 0,13''$ .

Також проводилось вимірювання випадкової складової похибки.

На рис. 4 наведено стандартне СКВ випадкової складової похибки, обчислене з використанням СКВ, отримане для всіх граней призми (загальне СКВ). Крива 1 побудована для випадку, коли на початку була виконана серія з 50 прийомів, а потім безперервно вимірювання проводились серіями по 5, 17 150 прийомів у кожній. З кривої видно, що стандартне СКВ одного прийому, обчислене по всіх кутах призми, змінюється від  $0,08''$  до  $0,14''$ . Цей діапазон суттєво перевищує теоретичний довірчий інтервал і припустимо є наслідком дрейфу систематичної складової похибки.

Похибка вимірювання кутів визначалась наступним чином. Кути багатогранної призми вимірювались на цьому ж приладі методом калібрування [2] з перестановками з кутовим кроком 15 град. (всього 24 положення). У кожному з положень вимірювання проводились з осередненням за 10 прийомів. Потім обчислювались середні значення кожного з кутів  $< \varphi_{ic}$  (де  $i$  - номер кута), одержаних у всіх 24 положеннях призми. Таким чином була проведена атестація призми.

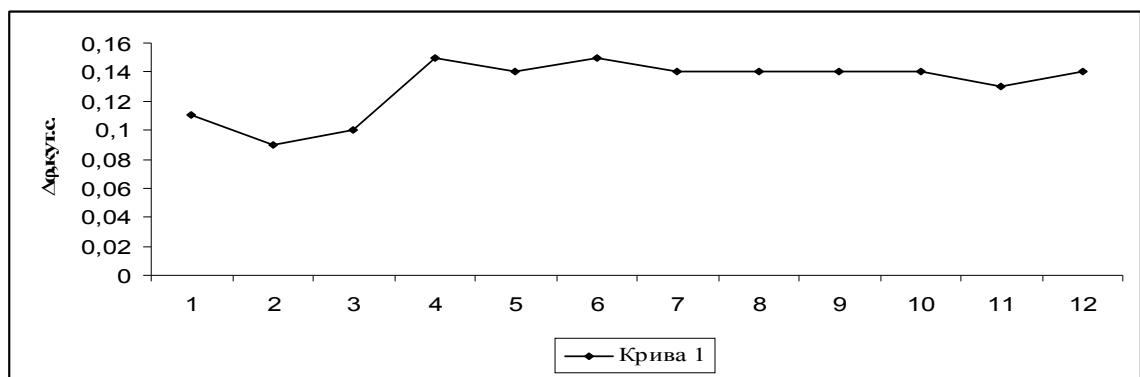


Рис. 4. Середні квадратичні відхилення довгочасної стабільності випадкової складової похибки

Після цього атестована призма установлювалась у початкове положення де проводились вимірювання всіх її кутів  $\varphi_{ik}$  з осередненням за 50 прийомів.

Похибка гоніометра обчислювалась як різниця:

$$\Delta\varphi_{ik} = \varphi_{ik} - \varphi_{ie} \quad (2)$$

Слід відзначити, що оцінка похибки гоніометра за допомогою призми, атестованої на цьому ж приладі методом калібрування, має переваги порівняно з оцінкою похибки за допомогою зразкової призми, атестованої на приладі, побудованому на інших принципах.

При атестації призми одним з важливих джерел похибки є вплив відхилень від площини її граней. Метод калібрування дозволяє значно зменшити цю складову похибки, тому що вона буде однаково вноситись як при визначенні кутів призми, так і при оцінюванні похибки приладу.

Були проведені 3 серії оцінювання похибки вимірювань з місячною перервою між серіями. У кожній серії проводились вимірювання з осередненням за 50 прийомів. На графіку рис. 5 наведені систематичні складові похибки цих серій.

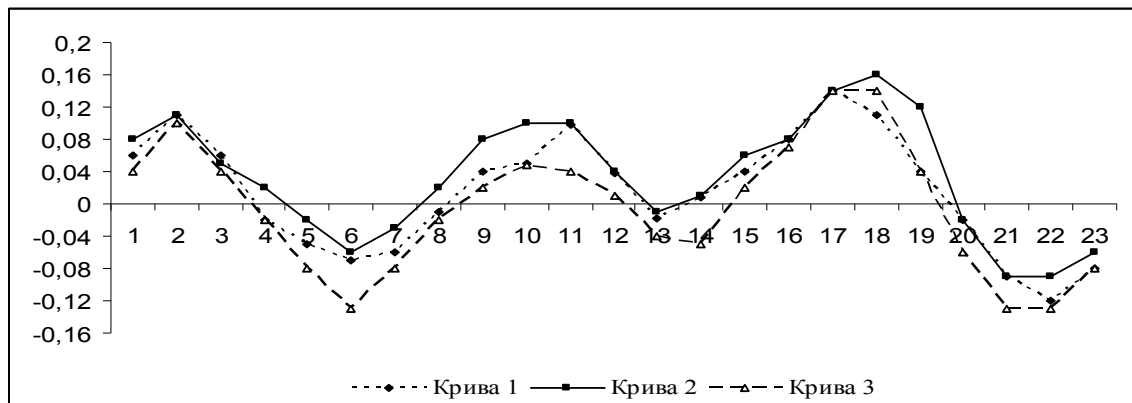


Рис. 5. Систематичні складові похибки серій, які проводились з місячною перервою

Максимальне відхилення систематичної складової похибки не перевищує  $0,16''$ . Форма кривих похибки має синусоїдальну складову, період якої дорівнює 120 кут. град. Причому початок кривої похибки знаходиться в точці перетину кривої нульового рівня. Ця похибка визначається особливостями конструкції поворотної платформи гоніометра, яка має три опорні площі, розташовані під 120 кут. град., причому початок відліку кутів проводиться тоді, коли перша грань призми знаходиться посередині між двома опорами.

Ці вимірювання, а також інші експерименти показали, що систематична складову похибки приладу визначається деформаціями поворотної платформи між трьома опорами.

#### Висновки:

1. Систематична складову похибки не є постійною, а змінюється як від серії до серії при одному включенні, так і від включення до включення. Ці зміни можуть бути представлені як постійне для даної серії відхилення з випадковою величиною, на яку накладається періодична крива. Постійна складову знаходиться у межах  $\pm 0,06''$ , максимальне відхилення кривої, що накладається на постійну складову –  $\pm 0,07''$ . Зміни систематичної складової похибки у всіх умовах експлуатації не перевищують  $\pm 0,13''$ .

2. Стандартне СКВ випадкової складової похибки змінюється від серії до серії у діапазоні від 0,08" до 0,14". Ці зміни значно перевищують довірчий інтервал. СКВ розподілено по гранях приблизно рівномірно, однак на першому і останньому куті маємо незрозумілий спад приблизно на 30%.

3. Систематична складова похибки має синусоїдальну складову з періодом 120 кут. град., і визначається трьома точками опори поворотної платформи. Максимальне відхилення систематичної складової похибки не перевищує 0,16".

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Система углоизмерительная ГС1Л. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Украина. ЦКБ «Арсенал».
2. *Островский Г.Н., Дулов М.И., Драудин А.Т.* Метод калибровки угломерных шкал и приборов с одновременной аттестацией. Оптико-механическая промышленность, 1986. №7, с. 8–10.
3. ГОСТ 8.366-77. «Гониометры. Методы и средства поверки.» Из-во стандартов, 1978, 12 с.
4. *Артемов И.М., Балантер Б.Э., Ковчин С.А. и др.* Комплекс эталонных и образцовых средств для воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений. Труды метролог. Ин-тов СССР, 1977, вып. 205, с.3-7.
5. *Афанасьев В.А.* Оптические измерения: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб.и доп. – М.: Высш. Школа, 1981. – 229 с., ил.
6. *Батраков А.С., Бутусов М.М., Гречка Г.Л. и др.; Под ред. Лукьянова Д.П.* Лазерные измерительные системы. М.: Радио и связь. 1981. 256 с.
7. *Bezvesilnaya E., Zaysev Y.* Angle measuring Instruments On Laser Gyro Base // Symposium gyro technology, 1999. - Stuttgart, Germany. – p. 80-89.
8. *Ванюрихин А.И., Зайцев И.И.* Автоматизированный гониометр на основе кольцевого лазера. Оптико-механическая промышленность (Soviet Journal of Optical Technology), 1982. № 9, с. 28-31.
9. Оптические приборы в машиностроении: Справочник. – М.: Машиностроение, 1974. – 238 с.
10. *Проненко В.И., Иносов В.Л.* Анализ погрешностей измерения плоского угла в интервале времени // Измерительная техника. –1974. №1. с.11-14.
11. Сайт в Інтернеті: <http://www.moeller-wedel.com>.
12. Сайт в Інтернеті: <http://www.ssga.ru>.

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна – заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- комп’ютеризовані інформаційні системи;
- гравіметри;
- вимірювальні перетворювачі.

КУР’ЯТА Світлана Валеріївна – магістрант кафедри автоматизації і комп’ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- комп’ютеризовані інформаційні системи;
- вимірювальні перетворювачі;
- системи автоматичного керування.

Подано 29.03.2005

**Безвесільна О.М., Кур'ята С.В.** Експериментальні дослідження систематичних та випадкових похибок гоніометра.

**Безвесельная Е.Н., Курьята С.В.** Экспериментальные исследования систематических и случайных погрешностей гониометра.

**Bezvesilnaya E.N., Kuryata S.V.** The experimental investigations of systematic and accidental goniometer errors.

УДК 531.383

**Експериментальні дослідження систематичних та випадкових похибок гоніометра / О.М. Безвесільна, С.В. Кур'ята.**

У статті розглянуті результати експериментального дослідження систематичних та випадкових похибок гоніометра. Проаналізовано зміни похибок в залежності від серії вимірювання та включення приладу.

УДК 531.383

**Экспериментальные исследования систематических и случайных погрешностей гониометра / Е.Н. Безвесельная, С.В. Курьята.**

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований систематических и случайных погрешностей гониометра. Проанализировано изменения погрешностей в зависимости от серии измерений и включения прибора.

УДК 531.383

**The experimental investigations of systematic and accidental goniometer errors / E.N. Bezvesilnaya, S.V. Kuryata.**

The experimental investigation results of systematic and accidental goniometer errors are investigated in the article. Changes in errors are analyzed depending on measurement series and switching the appliance on and off.