

УДК 681.2.5

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317966>

Р. І. Туренко¹, *інженер-конструктор*, **С. М. Приходько**², *заст. нач. відділу*

КОМПЕНСАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФУ КІЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ГІРОСКОПУ

Уа

В роботі розглядається методи та алгоритми компенсації температурного дрейфу сигналу кутової швидкості. Розглянуто вплив конструкції на властивості лазерного гіроскопу. Запропоновано математичну модель та алгоритм компе-

¹ КП СПБ «Арсенал», студент PhD КПІ ім. Ігоря Сікорського.

² КП СПБ «Арсенал»

насації температурної залежності вихідного сигналу лазерного гіроскопа.

En The paper investigates methods and algorithms for compensating the temperature drift of the angular velocity signal. The influence of the design on the properties of the laser gyroscope is examined. A mathematical model and algorithm for compensating the temperature dependency of the output signal of the laser gyroscope are proposed.

Вступ

Найпоширенішими датчиками для виміру кутової швидкості, у високоточних БІНС є кільцеві лазерні гіроскопи (КЛГ) [1]. Побудовані на законах оптики та квантової механіки, вони забезпечують вимір приросту кута повороту в інерціальному просторі з високою точністю. Критерієм вибору є універсальність таких сенсорів, а саме велика частота вихідного сигналу, широкий діапазон вимірювальних кутових швидкостей, робота під час значних експлуатаційних навантажень, їх ресурс та надійність [2] ... [5].

Лазерні гіроскопи та БІНС на їх основі виготовляють в Україні на підприємстві, яке має відповідні технології та замкнутий цикл виробництва.

У цій статі автори дослідили характеристики КЛГ *RL-16* та запропонували алгоритм компенсації температурного дрейфу (ТК) вихідного сигналу кутової швидкості. Дослідженню методів і способів компенсації температурних похибок лазерних гіроскопів присвячено значна кількість наукових робіт [6] ... [10]. Однак, у більшості з них автори проводять дослідження для статичних умов. Проте, з огляду на цільове призначення КЛГ, необхідно враховувати адекватність моделей і роботу алгоритмів термокомпенсації в динамічних умовах.

Постановка задачі

Метою цієї роботи є побудова удосконаленого алгоритму для температурної компенсації сигналу гіроскопа *RL-16* та зменшення його температурного дрейфу, запровадження схемо-технічних та алгоритмічних рішень для зменшення прояву похибок, що спричинені температурним впливом в статичних та динамічних умовах. Для врахування впливу температури проводились дослідження та аналіз супутніх сигналів КЛГ, пошук місця оптимального розташування термодатчиків, динамічні перевірки гіроскопа *RL-16* зі зміною орієнтації у просторі.

Ця стаття сфокусована на дослідженні причин появи похибки нестабільності зміщення нуля (або температурного дрейфу) КЛГ від впливу температури, як у разі зміни зовнішніх умов експлуатації, так і під час саморозігріву КЛГ. Крім цього розглянутий вплив зміни просторової орієнтації приладу на температурний дрейф.

Моделі компенсації температурного дрейфу

Провідні розробники КЛГ майже не висвітлюють алгоритми компенсації температурного дрейфу сигналу гіроскопу. У відкритій літературі розглянуті декілька основних моделей температурної корекції. Рівняння математичної моделі термокомпенсації, що описане у [3, 6, 8, 9], вважається класичною моделлю корекції температурного дрейфу лазерного гіроскопу на основі полінома з певними коефіцієнтами.

$$B_{TC} = K_1(T_{TD})^3 + K_2(T_{TD})^2 + K_3(T_{TD}), \quad (1)$$

де T_{TD} – значення температури, $K_{1...3}$ – деякі коефіцієнти.

Однак важливо наголосити на тому, що впровадження будь-якого алгоритму корекції типу (1) хоч і зменшує температурний дрейф КЛГ, але не усуває його повністю. Також автори зазначених робіт не розкривають, як визначається еталонна температура, місця розташування датчиків температури на моноблоці КЛГ та його розміри.

Аналіз експериментальних даних

Проведено цикл експериментальних досліджень трьох зразків КЛГ *RL-16* у діапазоні температур від мінус 40°C до 50°C , результати яких наведені на рис. 1.

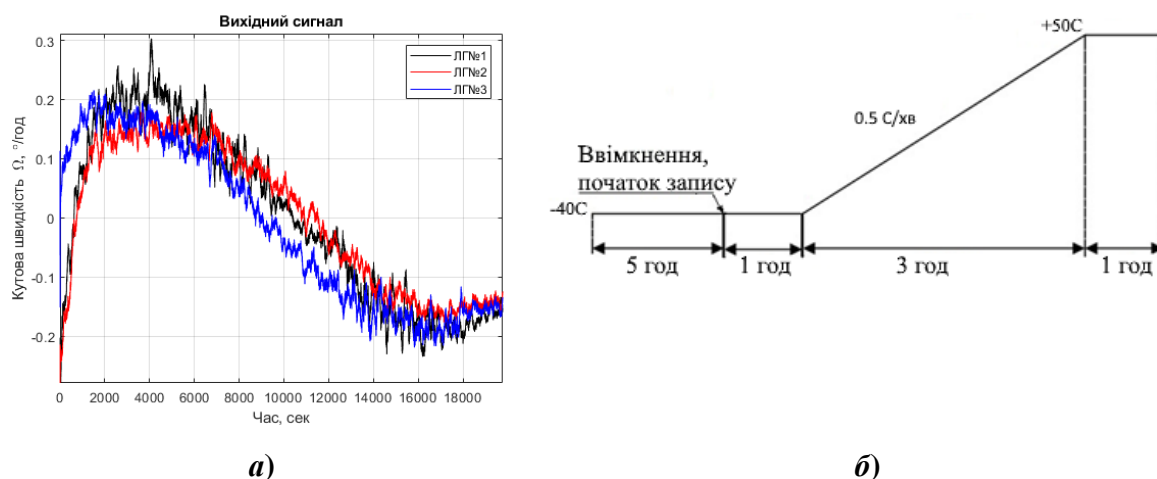


Рис. 1. *a)* Зміна кутової швидкості КЛГ *RL-16* у діапазоні температур мінус 40°C ... 50°C , *б)* температурний профіль

Кожний набір даних зразка КЛГ розглядається як випадковий процес. На (рис. 1, *a*) зображені типові вихідні сигнали кутової швидкості *RL-16* та профіль зміни температури при випробуваннях (рис. 1, *б*). Для зменшення похибки квантування та наочності температурного дрейфу використовується додаткова фільтрація ФНЧ.

На рис. 1, *a* спостерігається початковий дрейф, пов'язаний із явищем самопрогріву, який переходить у спадний тренд, пов'язаний із зовнішньою

зміною температури. Амплітуда сигналу у перші пів години роботи складає $0,5^\circ/\text{год}$, хоча зовнішня температура є стабільною. Із початком градієнту температури (рис. 1, б) відбувається поява спадного тренду, дрейф сигналу складає $0,5^\circ/\text{год}$, і перехід у додатній величиною $0,1^\circ/\text{год}$ у разі досягнення температури $+50^\circ\text{C}$.

Шляхи зменшення температурного дрейфу

Першочерговим етапом досліджень було завдання виявити елементи конструкції КЛГ, які мають локальний розігрів та найбільше впливають на зміну температури усередині корпусу приладу. Для цього були проведені статичні запуски при фіксованій температурі 20°C у термокамері. У процесі запусків записувались показники температурних датчиків, що були встановлені у різних місцях моноблоку. Додатково проводилась зйомка температури тепловізором.

Другим етапом було дослідження плат стабілізаторів струмів розряду та умови щодо їх симетричного тепловиділення, а саме, змінено конструкцію плат та розташування елементів із найбільшим тепловиділенням, впроваджено покращений алгоритм балансування струмів.

Проведено дослідження системи стабілізації периметру у діапазоні зміни температур $-40^\circ\text{C} \dots +50^\circ\text{C}$ (рис. 2). Спостерігається зміна максимумів мод лазера (рис. 2, а), що свідчить про фізичні зміни у конструкції оптичного резонатору. Для боротьби із цим недоліком було змінено конструкцію та технологію напilenня дзеркал. Це дало змогу зменшити температурну чутливість елементів оптичної стабілізації периметру оптичного контуру КЛГ (рис. 2, б).

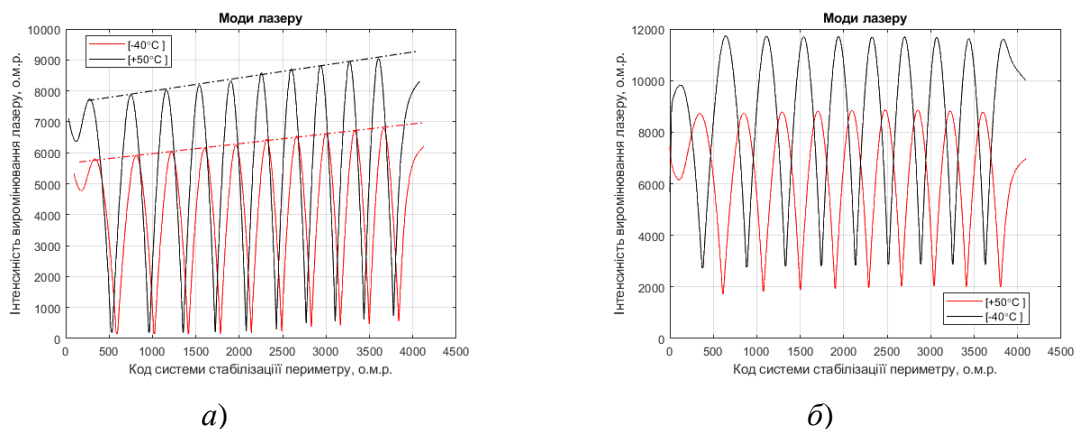


Рис. 2. а) Моді лазерної генерації КЛГ; б) Моді лазерної генерації КЛГ із новими дзеркалами

Після проведених змін був проведений повторний цикл випробування трьох доопрацьованих зразків КЛГ *RL-16* у діапазоні температур від мінус 40°C до 50°C . На рис. 3 наведено типовий вихідний сигнал після про-

ведених змін, на якому спостерігається суттєве (≈ 3 рази) зменшення дрейфу без застосування алгоритмічної температурної компенсації.

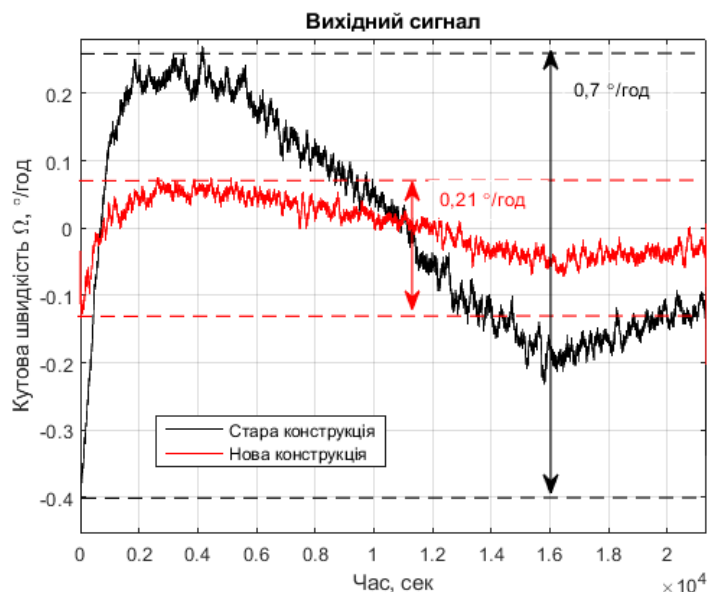


Рис. 3. Порівняння впливу на вихідний сигнал конструкційних змін

Математична модель сигналу КЛГ *RL-16* із температурною компенсацією має наступний вигляд [1, 3, 11, 12]:

$$\Omega = \Omega_{raw} - \Omega_0 - B_{TC}, \quad (2)$$

де Ω_{raw} – вихідний сигнал, Ω_0 – еталонне значення кутової швидкості, B_{TC} – додатак для температурної компенсації сигналу.

Тому, на початку модель [6] температурної компенсації сигналу була обрана наступною:

$$B_{TC} = K_1(\Delta T) + K_2(\nabla T) + K_3(\Delta T)^2, \quad (3)$$

де ΔT – різниця двох температурних датчиків, встановлених у різних місцях, ∇T – градієнт сигналу ΔT , $K_{1...3}$ – коефіцієнти моделі.

Спостерігається кореляція типового вихідного сигналу КЛГ *RL-16* та коригуючого поліному відповідно до формули (3) у діапазоні температур від мінус 40°C до $+50^\circ\text{C}$.

Результати проведених випробувань показали позитивні результати впровадженого алгоритму, однак до недоліку можна віднести залишок початкового тренду, який пов'язаний із явищем самопрогріву, та залишковий тренд у діапазоні температур. Для компенсації цих явищ були впроваджені зміни до алгоритму, а саме, допоміжні складові моделі від сигналу температурного датчика, встановленого на корпусі. У формулі (4) наведено остаточну модель температурної компенсації сигналу КЛГ.

$$B_{TC} = K_1(\Delta T_{TD}) + K_2(\nabla T_{TD}) + K_3(\Delta T_{TD})^2 + K_4 T_K + K_5 F(\tau), \quad (4)$$

де $F(\tau)$ – функція від часу, $\Delta\tau$ – час роботи, T_K – показники корпусного термодатчика, $K_{4\dots5}$ – коефіцієнти моделі.

Остаточні результати випробувань КЛГ RL-16 після впровадження моделі (4) наведено на рис. 4. Порівняно із початковим температурним дрейфом $0,2\dots0,3$ °/год вдалось суттєво зменшити дрейф сигналу у діапазоні температур до $0,03\dots0,05$ °/год.

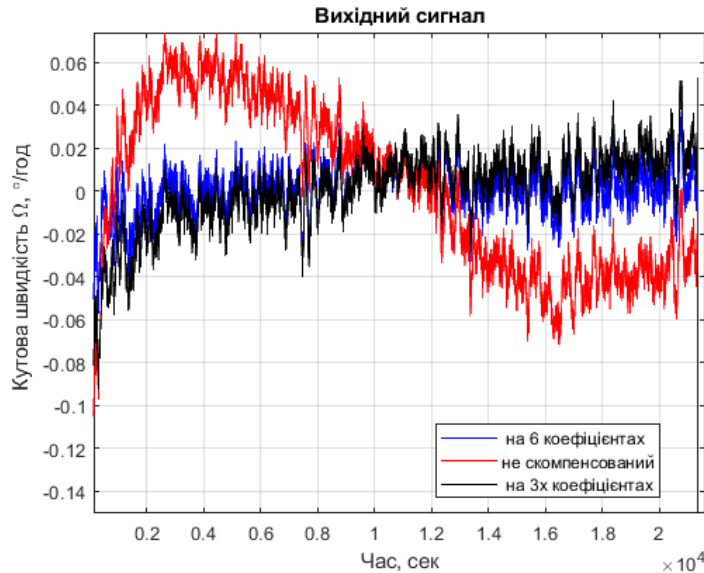


Рис. 4. Кутова швидкість ЛГ у діапазоні температур із застосуванням ТК

Наступним кроком досліджень була перевірка роботи алгоритму ТК за фіксованої температури 20°C та зміні орієнтації осі чутливості КЛГ. Ця перевірка дозволяє оцінити працездатність алгоритму, як у разі саморозігріву приладу, так і за швидкої зміни температури у результаті внутрішньої конвекції. Результати випробувань КЛГ № 1 – № 3 представлено на рис. 5 відповідно.

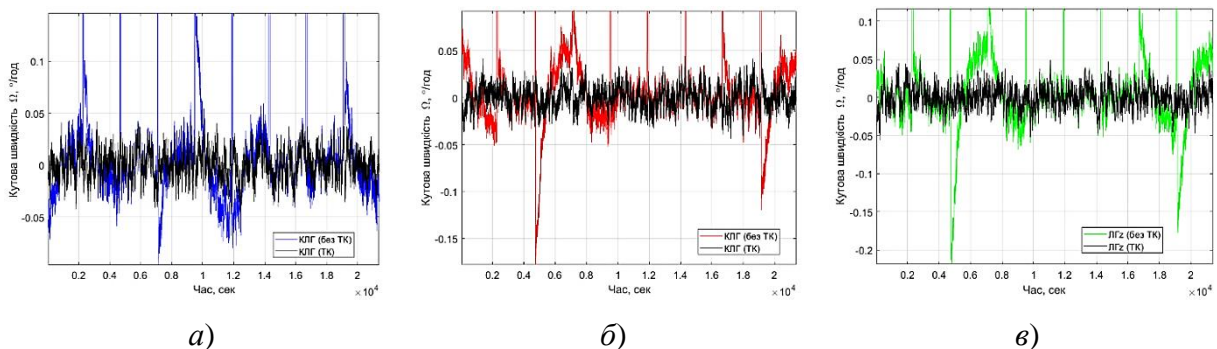


Рис. 5. Динамічні випробування КЛГ: а) № 1, б) № 2, в) № 3

Запис даних у зазначених далі положеннях здійснювався в одному запуску із послідовною зміною орієнтацій приладу. Зміна кожного положення відображається на графіку вертикальними лініями у сигналі кутової швидкості.

Випробування проводились за допомогою двовісного імітатора руху із кліматичною камерою на кожному КЛГ у наступній послідовності:

- Чотири положення в азимуті відповідно до напрямків сторін світу, при цьому вісь чутливості напрямлена вгору;
- Чотири положення довкола осі чутливості, зорієнтованої перпендикулярно до азимутального положення.
- Вісь чутливості відхилена на кут 55° відносно нормалі.

Модель (4) підтвердила свою ефективність під час динамічних перевірок. Нестабільність сигналів КЛГ у всіх заданих орієнтаціях відповідає необхідним вимогам – $0,05$ °/год.

Висновки

1. За результатами досліджень КЛГ *RL-16* виявлені важливі фактори впливу на величину дрейфу, визначені місця встановлення та необхідна кількість датчиків температури. Запроваджений алгоритм (4) підтвердив свою ефективність та універсальність, як у разі роботи у широкому діапазоні температур, так і за різних орієнтаціях КЛГ у просторі.
2. Експериментальні випробування запропонованого алгоритму підтвердили зменшення дрейфу сигналу гіроскопів *RL-16* із $0,6...0,7$ °/год до $0,03...0,05$ °/год.
3. Проблеми, що пов'язані із нестабільністю сигналів КЛГ через наявний температурний дрейф, суттєво впливають на точність гіроскопу та похибки БІНС. Дослідження із зменшення температурного дрейфу КЛГ активно продовжуються. Вони вимагають проведення тривалих лабораторних дослідження та моделювання роботи алгоритмів температурної компенсації для реальних приладів. Дослідження такого типу є важливим конструювання КЛГ менших периметрів

Список використаної літератури

1. *Titterton, D. H., Weston, J. L.* Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004.
2. *Gao, W., Kim, S. W., Bosse, H., Haitjema, H., Chen, Y. L., Lu, X. D., Knapp, W., Weckenmann, A., Estler, W. T., Kunzmann, H.* Measurement technologies for precision positioning. In: CIRP Ann.-Manuf. Technol. 2015, vol. 64, pp. 773–796.
3. *Aronowitz, F.* Fundamentals of the ring laser gyro. Optical gyros and their application, 1999, 339.
4. *Smith, S. G.* Developments in inertial navigation. In: J. of Navigation 1986, vol. 39, pp. 401–414.
5. *Faucheux, M., Fayoux, D., Roland, J. J.* The ring laser gyro. In: J. of Optics 1988, vol. 19, pp. 101–115.

6. *Seon, H. W., Soo, L. K., Soo, P. B., Youp, H. J., Hyun, S. S.* The compensation method for thermal bias of ring laser gyro. In: LEOS 2008-21st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. New York: IEEE, 2008, pp. 723-724.
7. *Li, G., Wang, F., Xiao, G., Wei, G., Zhang, P., Long, X.* Temperature compensation method using readout signals of ring laser gyroscope. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 10, pp. 13320-13332.
8. *Tao, Y., Li, S., Zheng, J., Wu, F., Fu, Q.* High precision compensation for a total reflection prism laser gyro bias in consideration of high frequency oscillator voltage. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 13, p. 2986.
9. *Weng, J., Bian, X., Kou, K., Lian, T.* Optimization of ring laser gyroscope bias compensation algorithm in variable temperature environment. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 2, p. 377.
10. *Wei, G., Li, G., Wu, Y., Long, X.* Application of Least Squares-Support Vector Machine in system-level temperature compensation of ring laser gyroscope. *Measurement*, 2011, vol. 44, no. 10, pp. 1898-1903.
11. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis. New York: IEEE, 2005, 1-145. DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.9061191.
12. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros. New York: IEEE, 2006, 1-96. DOI: 10.1109/IEEESTD.2006.246241.