

В. В. Чіковані¹, *д.т.н., проф.*; С. О. Пономаренко², *к.т.н., с.н.с.*,
С. В. Головач³, *к.т.н.*, П. О. Піщела⁴, *PhD студент*

ВЗАЄМНЕ КАЛІБРУВАННЯ ЗМІЩЕННЯ НУЛЯ ДВОХ СПІВВІСНИХ ГІРОСКОПІВ У РУСІ

Ua У роботі розглядається метод корекції систематичної компоненти зміщення нуля двох співвісних гіроскопів у русі при самих загальних припущеннях на її модель. Цей метод дозволяє об'єднувати в єдиний блок різні MEMS та не-MEMS або оптичні гіроскопи. Алгоритм, що реалізує цей метод потребує початкового калібрування на стоянці, наприклад, на основі зовнішньої інформації. Надалі, на основі сумісної обробки інформації залишкових датчиків, алгоритм видає більш точну інформацію про кутову швидкість так званого «віртуального» гіроскопа, що значно перевищує звичайне середнє значення показів цих гіроскопів. Наведено застосування методу корекції до результатів вимірювань двох співвісних вібраційних гіроскопів з металевими резонаторами на стоянці та у русі.

En The paper considers a method for systematic component correction of two coaxial gyroscope biases in motion under the most general assumptions about their models. This method allows combining heterogeneous MEMS and non-MEMS or optical gyroscopes into a single unit. The algorithm that implements this method requires initial calibration at the stop, for example, based on external information. Further, the algorithm uses the combined processing of data from the redundant sensors to provide more accurate angular rate of the so-called “virtual” gyroscope. The accuracy of the “virtual” gyroscope significantly exceeds the usual average value of these gyroscopes’ data. An application of the correction method to the measurement results of two coaxial metallic resonators’ vibratory gyroscopes is given.

Вступ

Останнім часом розвиток технології мікроелектромеханічних систем (MEMS) дозволяють мати досить мали габарити MEMS гіроскопів. Ці гіроскопи мають великий потенціал для застосування, наприклад, таких як віртуальна реальність, автомобільна навігація, інерціальна навігація для малих безпілотних літальних апаратів, а також аерокосмічна авіоніка. Крім того, у порівнянні з сучасними не-MEMS гіроскопами, таких як вібраційні або оптичні гіроскопи, вони мають переваги, включаючи компактний розмір навидь для надлишкових гіроскопічних блоків, що містять 6 MEMS гі-

¹ Національний авіаційний університет

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

³ АТ «ЕЛМІЗ»

⁴ КПІ ім. Ігоря Сікорського

роскопів, по 2 співвісних гіроскопів по кожній із трьох осей [1, 2], по 3 співвісних гіроскопів [2, 3], або 12 гіроскопів [4] розташованих по граням ікосаедра, при чому мають малу вагу, низьке енергоспоживання та низьку вартість внаслідок масовості їх виробництва [5 – 7].

Дрейф гіроскопа є основним фактором, який впливає на його точність. Отже, ефективно усунення дрейфу гіроскопа є найбільш важлива проблема для гарантування точності гіроскопа. Загалом, дрейф гіроскопа складається із двох компонентів систематичної та випадкової. Систематична компонента повільно змінюється і, як правило, похідна (швидкість) змінювання також змінюється. Випадкова компонента є корельованим стохастичним процесом, якій часто приймають за білий шум. Ці дві компоненти дрейфу оказують різний вплив на точність під час роботи гіроскопічного блока у режимі орієнтації і навігації.

Систематична компонента гіроскопа призводить до накопичення орієнтації зі швидкістю, пропорційною t^2 , де t є час руху, а накопичення похибки місце положення пропорційне t^3 , тоді як випадкова компонента, у припущенні білого шуму, призводить до накопичення похибки зі швидкістю \sqrt{t} і t відповідно [8]. Тому, головною проблемою зростання точності орієнтації і навігації є калібрування та корекція (компенсація) систематичної компоненти дрейфу гіроскопа, у якої похідна не дорівнює нулю і може змінювати знак, тобто зростати чи спадати.

Є багато методів обробки сигналів, що оцінюють дрейф гіроскопа. В основному ці методи використовують фільтр Калмана для оцінки коефіцієнтів прийнятої моделі дрейфу із урахуванням кореляції стохастичної компоненти та постійної компоненти систематичного дрейфу і сумісного оцінювання дрейфу та кутової швидкості [9 – 11]. Наприклад, у роботах [10, 11] дрейф гіроскопа моделюється як часовий ряд авторегресії ковзного середнього або його різниці першого порядку, що призводить до зменшення шуму та використовується для прогнозування дрейфу гіроскопа. Щоб отримати добрі результати з використанням цих методів треба, щоб параметри моделі були стабільні від включення до включення гіроскопів, а також протягом вимірювань. Це трудно досягти для дешевих МЕМС та не-МЕМС гіроскопів.

Роботи [12 – 17] об'єднують множину в основному МЕМС гіроскопів для зростання точності, якщо вихідні сигнали гіроскопів сильно корелюють між собою, наприклад з коефіцієнтом взаємної кореляції більше ніж 0,5. Вони також використовують фільтр Калмана для оцінки кутової швидкості. Така сумісна обробка вимірювань двох або кількох гіроскопів призводить до оцінювання кутової швидкості вдовж однієї осі так званого «віртуального» гіроскопа. У роботі [17] показано, що ця достатньо сильна взаємна кореляція у не-МЕМС гіроскопа існує тому, що виміри поступають із двох каналів одного гіроскопа з'єдиним чутливим елементом, що пра-

цює у диференційному режимі. Такий режим можна реалізувати і для МЕМС гіроскопа із осісиметричним резонатором. Однак, трудно припустити, що сигнали двох або кількох окремих незалежних співвісних, або не співвісних гіроскопів будуть мати сильну взаємну кореляцію.

Постановка задачі

У даній роботі пропонується метод взаємного калібрування та корекції систематичних компонентів дрейфів двох окремих незалежних співвісних гіроскопів у русі, що вимірюють одну й ту ж кутову швидкість на основі загальної моделі цієї компоненти дрейфу, яка повільно змінюється так, що її похідна (швидкість) також може змінюватися. Основне припущення, що використовує метод є те, що на коротких інтервалах часу систематичний дрейф можна апроксимувати поліноміальною функцією. На основі сумісної обробки результатів вимірювання двох гіроскопів формується вимірювання кутової швидкості «віртуального» гіроскопа, що має більш високу точність, ніж кожний із них.

Опис методу

Блок схема алгоритму оцінювання кутової швидкості «віртуальним» гіроскопом, якій містить два співвісних гіроскопа у блоці представлена на рис. 1.

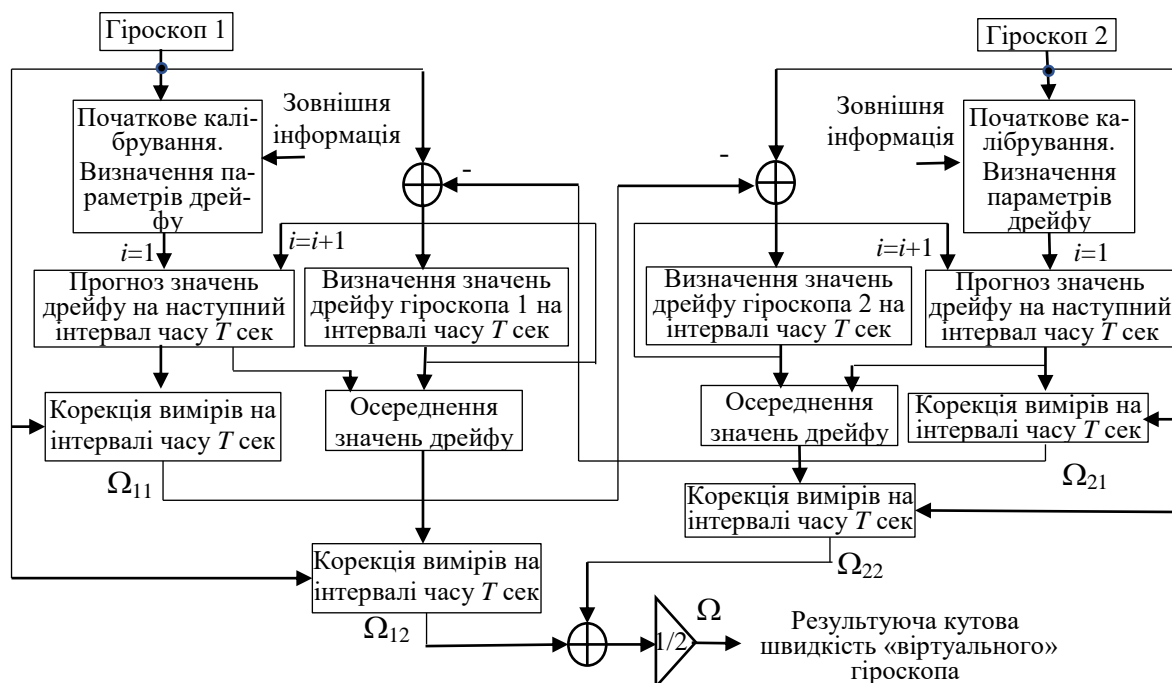


Рис. 1. Блок схема взаємного калібрування і корекції дрейфу двох співвісних гіроскопів у русі

Цей метод ітеративно калібрує та коректує дрейфи гіроскопів. Для початку ітеративного процесу калібрування та корекції треба початкове калібрування на стоянці. Надалі, під час роботи на стоянці або у русі, дрейф кожного гіроскопа по результатам початкового калібрування прогнозується на наступний інтервал калібрування тривалістю T сек, наприклад, по лінійної (або поліноміальної моделі більш високого порядку) в залежності від тривалості обраного часового інтервалу T сек. Потім слідує процедура корекції (компенсації), тобто прогнозне значення дрейфу віднімається від вихідного вимірювання, щоб отримати кутову швидкість, що вимірюється кожним гіроскопом. Далі кутова швидкість гіроскопа 1 (Ω_{11}) віднімається із вимірювань гіроскопа 2 на поточному інтервалі калібрування, щоб отримати оновлені значення дрейфу гіроскопа 2 та обчислити його параметри, а кутова швидкість гіроскопа 2 (Ω_{21}) віднімається із вимірювань гіроскопа 1 на поточному інтервалі калібрування, щоб отримати оновлені значення дрейфу гіроскопа 1 та обчислити його параметри. Дрейфи кожного гіроскопа, що отримані за результатами прогнозу та шляхом віднімання кутової швидкості іншого гіроскопа осереднюються та коректуються покази кожного гіроскопа. Потім коректовані значення кутової швидкості кожного гіроскопа Ω_1 та Ω_2 також осереднюються, формуючи результуючий вихідний сигнал «віртуального» гіроскопа. Далі ітерація повторюється, починаючи із прогнозу дрейфу на наступний інтервал калібрування та корекції тривалістю T сек, використовуючи параметри дрейфу, що отримані після віднімання кутової швидкості іншого гіроскопа.

Результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження були проведені на двох вібраційних гіроскопах ТВГ43М та ТВГ25 з металевими резонаторами виготовленими підприємство АТ «Елміз» у Києві.

Обидва гіроскопа були установлені на поворотну платформу стенду так, щоб їх осі чутливості були спрямовані вертикально вгору. Тому за допомогою апаратних та програмних засобів вихідні дані із обох гіроскопів одночасно записувались у внутрішню пам'ять ноутбука (рис. 2). Після статичних умов, що відповідають умовам стоянки, за допомогою програмного забезпечення задавались кутові рухи поворотної платформи стенду, параметри яких були заздалегідь відомі.

Таким чином, у статиці вони вимірювали суму вертикальної компоненти кутової швидкості Землі та зміщення нуля. Потім поворотна платформа стенду оберталася з кутовою швидкістю 50 град/с. Виміри обох гіроскопів, що зняті із частотою 500 Гц, показані на рис. 3. Ці гіроскопи є різного класу точності. ТВГ25 має більші шуми та дрейф, ніж ТВГ43М.

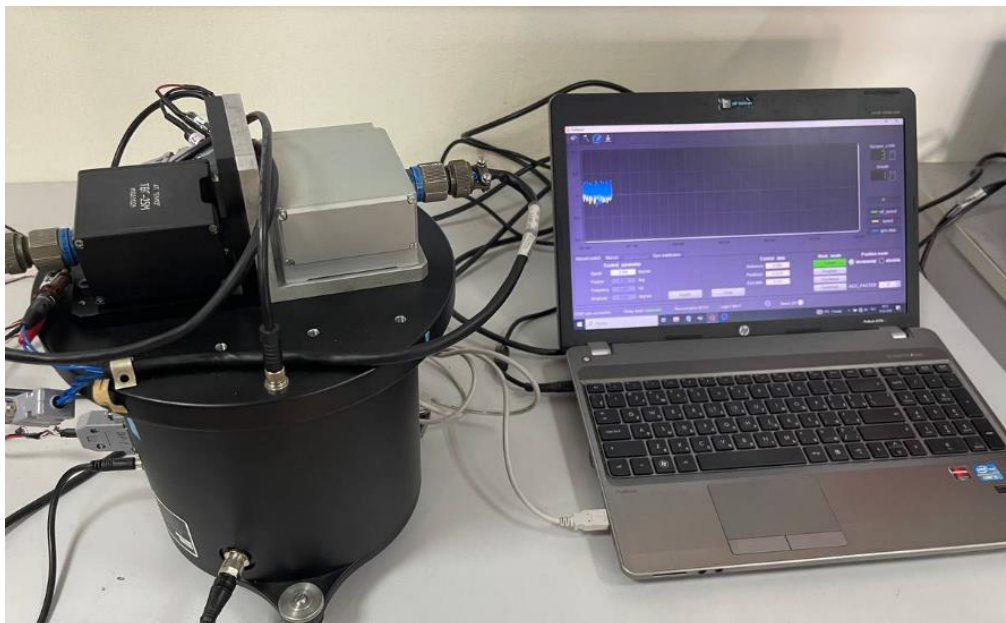


Рис. 2. Експериментальна установка двох співвісних гіроскопів на поворотній платформі з одночасним виводом їх вихідних сигналів на ноутбук

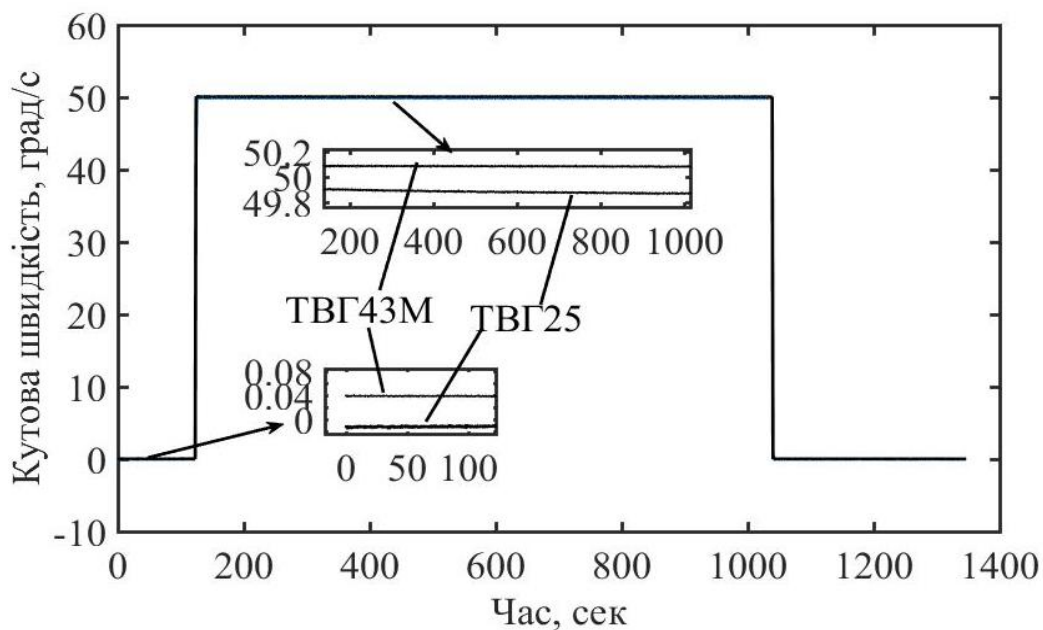


Рис. 3. Вихідні виміри двох гіроскопів

Для цих гіроскопів приймаємо лінійну модель систематичної компоненти дрейфу на інтервалі калібрування $T=10$ сек.

Результати розрахунків при роботі гіроскопів у статиці, коли платформа стенду не обертається, показані на рис. 4 разом із не коректованими показами обох гіроскопів та їх звичайне середнє для порівняння.

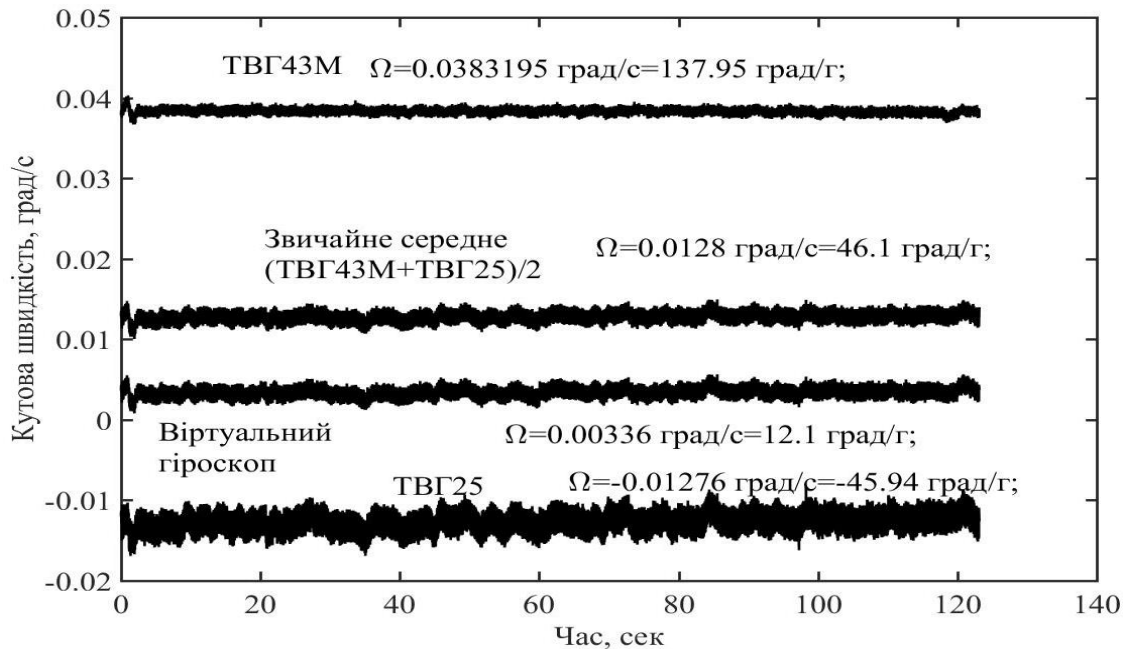


Рис. 4. Некоректовані покази гіроскопів ТВГ43М, ТВГ25 та віртуального гіроскопа у статистиці

У статистиці обидва гіроскопа вимірюють суму вертикальної компоненти кутової швидкості Землі, яка на широті лабораторії дорівнює 0,0032 град/с, та зміщення нуля.

Зміщення нуля кожного гіроскопа $D_{\text{ТВГ25}}$ та $D_{\text{ТВГ43М}}$, за припущенням, складається із постійного значення B та лінійного дрейфу $a \cdot t$ на інтервалі $T=10$ сек, тобто:

$$\begin{aligned} D_{\text{ТВГ25}} &= B_{\text{ТВГ25}} + a_{\text{ТВГ25}} \cdot t; \\ D_{\text{ТВГ43М}} &= B_{\text{ТВГ43М}} + a_{\text{ТВГ43М}} \cdot t. \end{aligned} \quad (1)$$

Як бачимо із рис. 4 похибка вимірювання вертикальної компоненти кутової швидкості Землі обома не коректованими гіроскопами дуже велика, що в основному обумовлено великими значеннями коефіцієнтів $B_{\text{ТВГ25}}$ та $B_{\text{ТВГ43М}}$, бо коефіцієнти $a_{\text{ТВГ25}}$ та $a_{\text{ТВГ43М}}$, тобто швидкість дрейфу, малі в порівнянні з ними. Таке співвідношення між цими компонентами дрейфу виконується практично для гіроскопів усіх типів.

Віртуальний гіроскоп у статистиці вимірює вертикальну кутову швидкість Землі із похибкою $\Delta=0,00336 - 0,0032=0,00016$ град/с=0,576 град/г. Звичайне середнє значення показів двох некоректованих гіроскопів також має дуже велику похибку, що дорівнює 46 град/г.

Похибка віртуального гіроскопа на кожному 10-секундному інтервалі упродовж вимірів у статистиці представлена на рис. 5. Як можна бачити із рис. 5 вона менше ніж 1 град/г. Накопичена похибка протягом 120 сек (2 хвилини) дорівнює 0,02 град, що прогнозується за 1 годину руху 0,6 град.

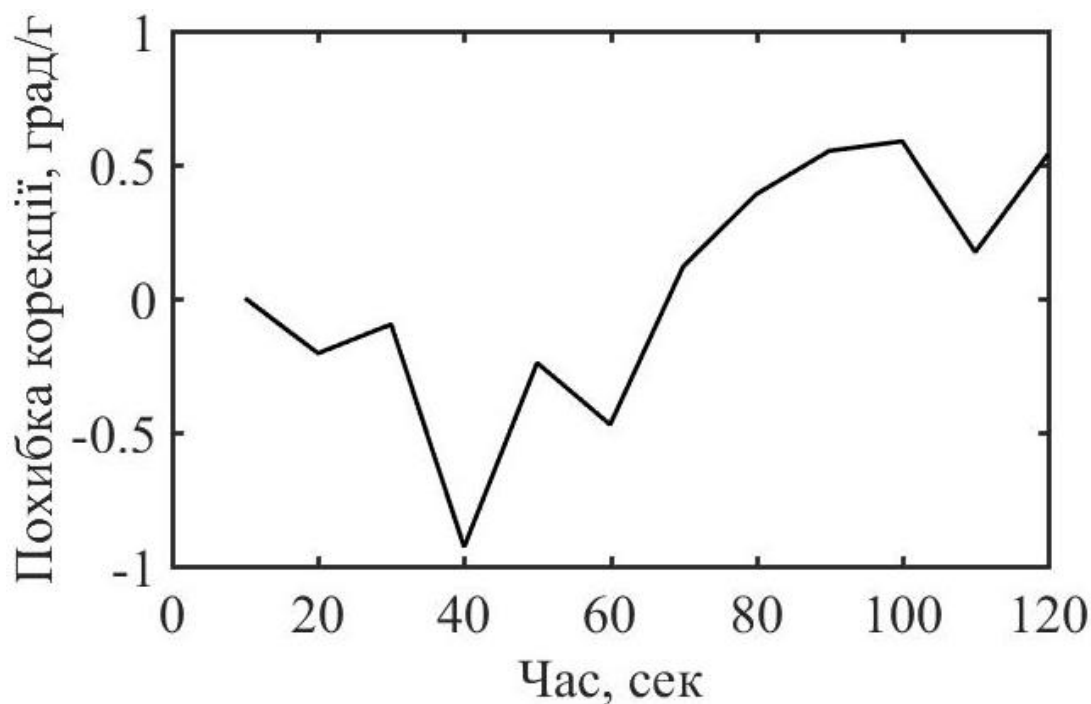


Рис. 5. Похибка віртуального гіроскопа у статиці

На рис. 6 представлені некоректовані виміри гіроскопів ТВГ25, ТВГ43М, їх звичайне середнє та віртуального гіроскопа, коли платформа стенду обертається зі швидкістю 50 град/с.

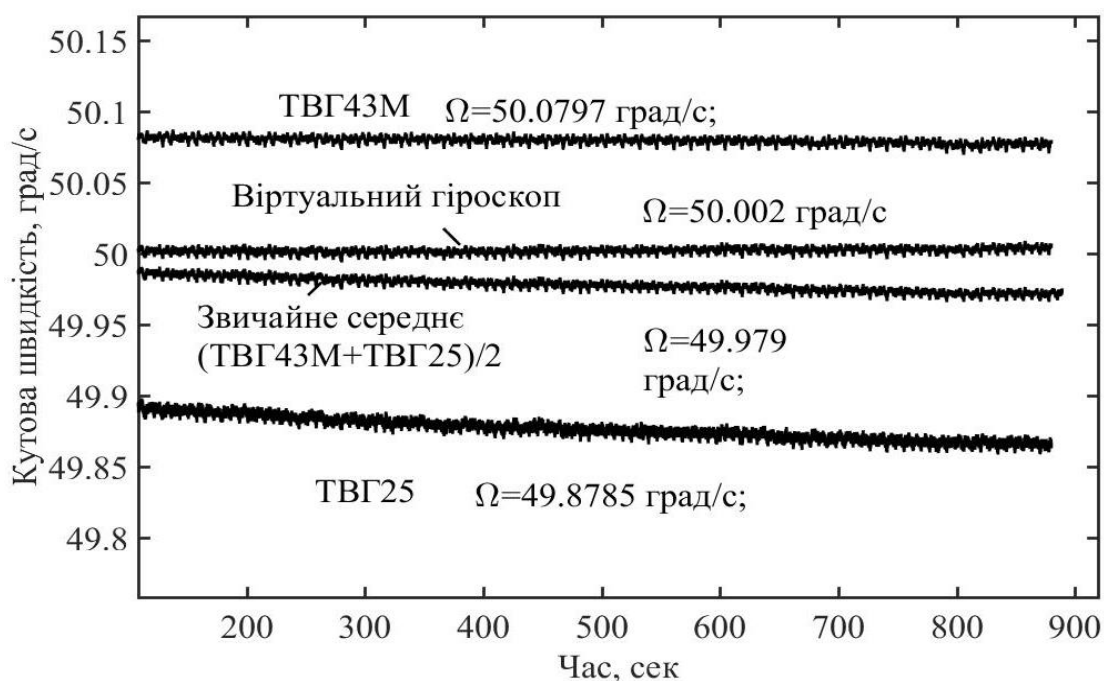


Рис. 6. Некоректовані покази гіроскопів ТВГ43М, ТВГ25, їх звичайне середнє та віртуального гіроскопа у динаміці

Як бачимо на рис. 6 точність вимірювання кутової швидкості 50 град/с віртуальним гіроскопом значно вище, ніж кожним окремим гіроскопом ТВГ25 та ТВГ43М, а також звичайне середнє їх показів.

Звичайне середнє значення показів двох некоректованих гіроскопів дає більш точний результат, ніж окремі гіроскопи. Середнє значення дорівнює 49,979 град/с.

Слід прийняти до уваги, що усі гіроскопи у динаміці, включаючи і віртуальний, вимірюють кутову швидкість обертання платформи 50 град/с та вертикальну компоненту кутової швидкості Землі 0,0032 град/с. Тому треба її відняти із середнього значення, тоді отримаємо

$$\Omega_{\text{ср}} = 49,979 - 0,0032 = 49,9758 \text{ град/с},$$

тобто похибка є $\Delta_{\text{ср}} = -0,0241$ град/с, а кутова швидкість, що вимірюється віртуальним гіроскопом, за вирахуванням вертикальної компоненти кутової швидкості Землі, дорівнює $\Omega_{\text{вирт}} = 50,002 - 0,0032 = 49,9988$ град/с, тобто похибка є $\Delta_{\text{вирт}} = -0,0012$ град/с. Таким чином, точність віртуального гіроскопа більше точності звичайного осереднення показів двох гіроскопів у $n = \Delta_{\text{ср}} / \Delta_{\text{вирт}} \approx 20$ разів.

На рис. 7 представлена похибка віртуального гіроскопа на кожному 10-секундному інтервалі упродовж вимірів у динаміці.

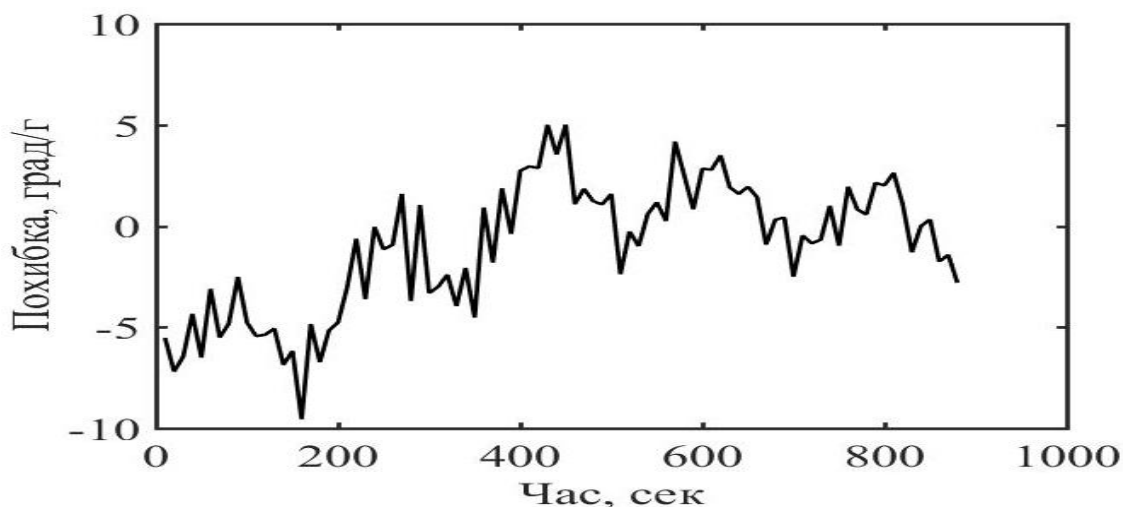


Рис. 7. Похибка віртуального гіроскопа у динаміці

Накопичена похибка протягом 900 сек (15 хвилин) дорівнює 0.0185 град, що прогнозується за 1 годину руху 0.074 град.

На рис. 8 та рис. 9 представлені криві корекції по представленому алгоритму, коли робиться взаємна корекція дрейфів гіроскопів ТВГ25 та ТВГ43М, відповідно, під час вимірів у статиці.

Чорні криві на цих рисунках є некоректовані виміри гіроскопів, а білі ламані криві представляють шматкові-лінійні корекції дрейфів обох гіроскопів. На кожному 10-секундному інтервалі корекції визначаються пара-

метри лінійної функції дрейфу (B та a) і вони використовуються для прогнозу дрейфу на наступний 10-секундний інтервал у відповідності зі блок-схемою рис. 1. Діапазон у нахилах прямих, що представлені на рис. 8 та рис. 9 дуже малі, на рівні $\pm(10^{-4}-10^{-5})$ град/с².

Для зростання точності компенсації дрейфу додатково визначаються параметри лінійної корекції дрейфу, шляхом віднімання показів іншого гіроскопа і осереднення двох дрейфів одного й того ж гіроскопа, що отримані різними шляхами.

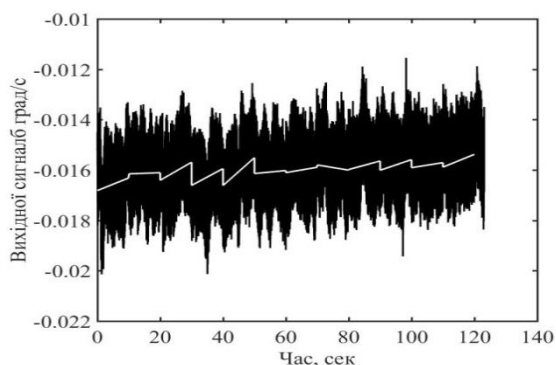


Рис. 8. Характер корекції гіроскопа ТВГ25 під час його роботи у статиці

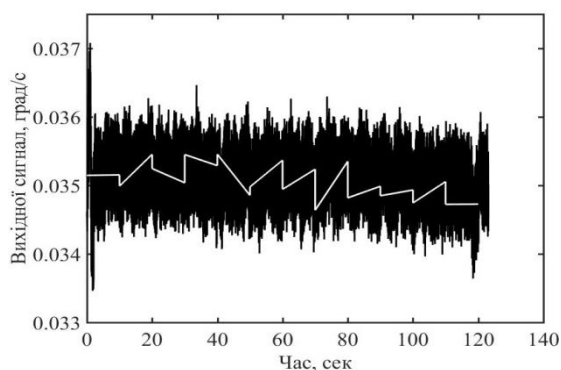


Рис. 9. Характер корекції гіроскопа ТВГ43М під час його роботи у статиці

У роботі [18] використовувався схожий алгоритм корекції, де представлена передбачувана залежність накопиченої похибки від часу, яка схожа на білі криві рис. 8 та рис. 9. Не глядячи на те, що під час використанні прогнозу похибка зростає вона зростає зі значно меншою швидкістю, ніж у разі некоректованих вимірах.

Висновки

Корекція похибок гіроскопів за допомогою залишкових датчиків набирає популярності серед дослідників у зв'язку із тенденцією сучасних інерціальних датчиків, гіроскопів та акселерометрів, до мало- та мікрогабаритності та дешевизні. Таки методи корекції не вимагають зовнішньої інформації, наприклад від GPS, що забезпечує таким системам імунітет проти засобів радіоелектронної боротьби і в той же час забезпечують малогабаритність та дешевизну усього блоку датчиків.

Запропонований у даній роботі алгоритм відрізняється від інших самими загальними припущеннями стосовно моделі систематичного дрейфу гіроскопів та компенсує похибку, яка накопичується швидше інших. Цей метод дозволяє використовувати в єдиному блоці різноманітні гіроскопи, наприклад, МЕМС та не-МЕМС гіроскопи, оптичні та вібраційні гіроскопи.

Якщо дрейф є дуже нестабільний треба зменшити тривалість інтервалу T прогнозу та корекції, або замість лінійної використовувати параболічну модель. Адже будь-яка крива дрейфу може бути представлена як зазвичай точно кусочно-постійної, кусочно-лінійної, кусочно-параболічної і так далі, залежно від вибору тривалості інтервалу часу T .

Коли у процесі корекції температура змінюється лінійна модель може дати значно кращий результат тому, що практично усіх гіроскопів систематична компонента лінійно змінюється, коли температура також лінійно змінюється, а не лінійності виявляються на більш тривалих інтервалах часу. В цьому випадку треба тільки правильно підібрати тривалість інтервалу T прогнозу та корекції. Слід також відмітити, що тривалість інтервалу T не може бути дуже малим, бо шуми гіроскопа можуть не забезпечити достатньої точності оцінки параметрів a та B . Тому, при виборі інтервалу T , слід також приймати до уваги шуми гіроскопа.

Список використаних джерел

1. *L. Xue, L. Wang, T. Xiong et al.* “Analysis of Dynamic Performance of a Kalman Filter for Combining Multiple MEMS Gyroscopes.”, *Micromachines* 2014, 5, 1034-1050; doi:10.3390/mi5041034.
2. *Faizullin, M., Ferrer, G.* (2021). “Best Axes Composition: Multiple Gyroscopes IMU Sensor Fusion to Reduce Systematic Error.” 2021, ArXiv. /abs/2107.02632.
3. *Xunsheng Ji* “Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array.”, Hindawi Publishing Corporation, *Mathematical Problems in Engineering* v. 2015, Article ID 120954, 6 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/120954>
4. *H. Chang, L. Xue, W. Qin, et al.* “An Integrated MEMS Gyroscope Array with Higher Accuracy Output.”, *Sensors* 2008, 8, 2886-2899, www.mdpi.org/sensors.
5. *Matthew J. Leszczynski* “Improving the performance of MEMS gyros via redundant measurements: theory and experiments.”, Master’s Thesis, Dec. 2014, Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5000, 101 pages, <http://hdl.handle.net/10945/44605>.
6. *W. Wang, X. Lv, F. Sun,* “Design of a novel MEMS gyroscope array,” *Sensors*, vol. 13, no. 2, pp. 1651–1663, 2013.
7. *Valeri V. Chikovani* “Vibratory Gyroscopes Based on Micro-Electro-Mechanical and non-Micro-Electro-Mechanical Systems.”, Cambridge Scholar Publishing, 2023, P. 375.

8. *P. D. Groves*. "Navigation using Inertial Sensors." IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 30(2):42-69 01 Feb 2015. DOI: 10.1109/MAES.2014.130191.
9. *X. He, M. Wu, and X. Hu*, "Research on closed-loop driving technology for silicon micro-gyroscope array," Measurement Control Technology, vol. 33, no. 3, pp. 64–67, 2014.
10. *L. Xue, C.-Y. Jiang, H.-L. Changye et al.* "A novel Kalman filter for combining outputs of MEMS gyroscope array," Measurement, vol. 45, no. 4, pp. 745–754, 2012.
11. *H. Pan, B. Yang, and L. Wang*, "Measurement of random gyro drift and establishment of mathematical model," Aerospace Shanghai, vol. 20, no. 3, pp. 20–23, 2003.
12. *Duslman*, "On gyro drift models and their evaluation," IEEE Transactions on Aerospace and Navigation Electronic, vol. 5, no. 2, pp. 230–234, 2002.
13. *D. S. Bayard*, "High accuracy inertial sensors from inexpensive components," NASA JPL New Technology Report NPO, NASA, 2003.
14. *H. Yanling, L. Bo, and Z. Guangtao*, "Design of a MEMS gyroscope array with high sensitivity," Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), vol. 42, no. 3, pp. 42–47, 2014.
15. *Y. Q. Zhang and S. R. Wang*, "Research on closed-loop driving technology for silicon micro-gyroscope array," Measurement Control Technology, vol. 33, no. 3, pp. 64–67, 2014.
16. *W. Wang, X. Lv, and F. Sun*, "Design of a novel MEMS gyroscope array," Sensors, vol. 13, no. 2, pp. 1651–1663, 2013.
17. *V. Chikovani, O. Suschenko, H. Tsiрук* "Redundant Information Processing Techniques Comparison For Differential Vibratory Gyroscope".- Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 4/7 (82), 2016, pp. 45-52, DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75206.
18. *V. V. Chikovani, S. V. Golovach* "A Vibratory Gyroscope Scale Factor and Bias On-run Self-calibration"// Electronics and Control Systems, N 3(69), 2021 pp.16-27. DOI:10.18372/1990-5548.69.16423.