

УДК 629.05

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771442022284633>

О. В. Заморський¹, к.т.н., доцент, С. В. Головач², к.т.н., головний конструктор, Г. Ю. Строкач³, аспірант

ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПУ В РЕЖИМІ ВИЗНАЧЕННЯ ІСТИННОГО АЗИМУТУ ЗАДАНОГО НАПРЯМКУ ТА ШИРОТИ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТА

Уа Досліджується точність визначення навігаційних параметрів, істинного азимуту заданого напрямку та широти місцеположення об'єкта, чутливим елементом тактичного класу точності для систем стабілізації і керування рухомими об'єктами – твердотільним вібраційним гіроскопом із циліндричним металевим резонатором. Під час дослідження застосована схема скануючого однокомпонентного аналітичного гіроскопічного компасу з можливістю забезпечення в процесі сканування вертикального напрямку вхідної осі датчика кутової швидкості – твердотільного вібраційного гіроскопа. Отримане в умовах, наближених до нормальних, середньоквадратичне значення $0,32^\circ \cdot \text{секф}$ похибки визначення істинного азимуту заданого напрямку підтверджує потенційну можливість застосування твердотільного вібраційного гіроскопу із циліндричним металевим резонатором в системах орієнтації і визначення курсу. Отримана при тих же умовах середня похибка $0,34^\circ$ визначення широти місцеположення об'єкта із середньоквадратичним значенням $0,22^\circ \cdot \text{секф} \cdot \sqrt{(1 + 2\cos^2 A)}$ її розкиду корелюється з очікуваною.

En The accuracy of determining navigation parameters, the true azimuth of the specified direction, and the latitude of the object's location is being investigated using a Coriolis vibratory gyroscope with a cylindrical metal resonator as a sensitive element of the tactical accuracy class for stabilization systems and control of moving objects. The study used a scheme of a scanning single-component analytical gyroscope compass with the ability to provide vertical direction scanning during the input axis of the angular velocity sensor – the Coriolis vibratory gyroscope. The obtained root-mean-square value of $0,32^\circ \cdot \text{секф}$ of the error in determining the true azimuth of the specified direction under conditions close to normal confirms the potential possibility of using a Coriolis vibratory gyroscope with a cylindrical metal resonator in orientation and attitude heading reference systems. The average error of $0,34$ in determining the latitude of the object's location obtained under the same conditions, with a root-mean-square value of $0,22^\circ \cdot \text{секф} \cdot \sqrt{(1 + 2\cos^2 A)}$ of it is scatter, correlates with the expected result.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² АТ «Елміз»

³ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Вступ

Твердотільні вібраційні гіроскопи (ТВГ) [1] за високими експлуатаційними характеристиками довговічності, надійності та стійкості до зовнішніх збурень є чи не найбільш конкурентно спроможною сучасною технологією гіроскопічних чутливих елементів для систем орієнтації, навігації і стабілізації рухомих об'єктів. Ще донедавна, майже до кінця 2010-х років, на ринку інерціальних навігаційних систем (ІНС) домінували сімейства ІНС на основі інших твердотільних гіроскопічних чутливих елементів – кільцевих лазерних гіроскопів (КЛГ) та волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ). Такими сімействами за високими стандартами є, наприклад, лінійки ІНС серії *Sigma* (модифікації серії – для морських, наземних, повітряних об'єктів) на основі КЛГ фірми *Sagem* (входить у групу компаній *Safran* під її брендом, Франція) та лінійки серії *Marins* (для морських об'єктів) і серії *Advans* (для наземних об'єктів) на основі ВОГ фірми *xBlue* (оновлений бренд фірми *iXsea*, Франція). Сучасний ринок вже пропонує такі ж стандартні сімейства ІНС на основі ТВГ – напівсферичних резонаторних гіроскопів (НРГ) із високими експлуатаційними характеристиками. Наприклад, сімейства ІНС на основі НРГ тієї ж компанії *Safran* – лінійки серії *BlueNaute* для морських об'єктів, серії *Black-Onyx* для океанських підводних човнів та серії *SkyNaute* для авіації. На ринку представлені також навігаційні системи комерційного класу, наприклад, морські гірокомпаси на основі НРГ серії *Standard* фірми *Raytheon Anschütz* (Німеччина). Середньоквадратична похибка визначення курсу об'єкта, наприклад, вказаними вище системами орієнтації і визначення курсу серії *BlueNaute* компанії *Safran*, складає $0,4^\circ \text{secф}$ для модифікації *Compass*, $0,2^\circ \text{secф}$ для *Premium*, $0,08^\circ \text{secф}$ для *Titanium* та *Platinum* [2], а вказаними гірокомпасами серії *Standard* фірми *Raytheon Anschütz* – $0,25^\circ \text{secф}$ для модифікації *Standard 30 MF* [3] і $0,1^\circ \text{secф}$ для *Standard 22 NX* [4].

НРГ відносяться до чутливих елементів навігаційного класу точності. Технологія виготовлення напівсферичних кварцових резонаторів НРГ достатньо складна, тому, залежно від модифікації, ціна ІНС на основі НРГ може бути значною. ТВГ із металевими резонаторами, які згідно класифікації ІЕЕЕ відносяться до коріолісових вібраційних гіроскопів (КВГ) [5], є більш технологічними у виготовленні, тому порівняно дешеві. ТВГ із металевими резонаторами відносяться до гіроскопічних чутливих елементів тактичного класу точності і присутні на ринку як одноосьові, двохосьові і трьохосьові інерціальні модулі датчиків кутової швидкості для систем керування рухомими об'єктами, для систем наведення і стабілізації. Проте, наприклад, фірма *Innalabs* (Ірландія) позиціонує ТВГ із металевими резонаторами також як недорогий чутливий елемент для визначення істинного азимуту заданого напрямку (*True North-Finders*) для цивільного ринку. Зазвичай вказуються такі характеристики ТВГ – зміщення нуля $0,01^\circ/\text{год}$ та

випадкове блукання кута $0,01 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{год}}$, необхідні для забезпечення точності визначення азимуту $0,06^\circ \text{sec}^{\text{ф}}$ [6].

Відомі дослідження двохосьових інерціальних модулів ТВГ із металевими циліндричними резонаторами діаметром 25 мм і 43 мм у режимі визначення істинного азимуту на нерухомій основі у разі постійної температури та у діапазоні температур від -15°C до $+50^\circ\text{C}$ [7]. Середньоквадратична похибка визначення азимуту склала для КВГ25 $0,44^\circ \text{sec}^{\text{ф}}$ та $0,2^\circ \text{sec}^{\text{ф}}$ у діапазоні температур і за постійної температури відповідно, для КВГ43 – $0,13^\circ \text{sec}^{\text{ф}}$ та $0,06^\circ \text{sec}^{\text{ф}}$ відповідно.

У роботах [8, 9] запропоновані альтернативні методики автономного визначення початкового значення широти місцеположення об'єкта із застосуванням трьохосьових інерціальних модулів гіроскопів і акселерометрів або лише трьохосьового модуля гіроскопів. У [8] вказуються експериментально отримані по альтернативній методиці граничні похибки визначення широти із застосуванням інерціального блоку КЛГ – $0^\circ 09' 14''$ ($0,154^\circ$) на широті $50^\circ 27' 00''$ та $0^\circ 16' 30''$ ($0,275^\circ$) на широті $50^\circ 00' 00''$. У роботі [10] запропонована методика автономного визначення широти місцеположення об'єкта однокомпонентним аналітичним гіроскопічним компасом на основі датчика кутової швидкості (ДКШ). Експериментальні дослідження ТВГ у режимі автономного визначення широти місцеположення об'єкта невідомі.

Постановка задачі

Метою дослідження є оцінка точності визначення навігаційних параметрів, істинного азимуту заданого напрямку та широти місцеположення об'єкта, гіроскопічним чутливим елементом тактичного класу точності для систем стабілізації і керування рухомими об'єктами – твердотільним вібраційним гіроскопом з циліндричним металевим резонатором діаметром 43 мм.

Методика досліджень

Випробовування ТВГ типу ТВГ-43 (АТ «Елміз», Україна) (рис. 1) проводились у лабораторних умовах, наближених до нормальних. Випробовування по однотипним циклограмам відбувалися із перервою у 12 діб (300 годин), різниця температур у приміщенні не контролювалась. Стационарне положення стендового обладнання і закріпленого на ньому ТВГ за цей період не змінювались. За одним включенням ТВГ випробовування повторювались через 4 години після завершення попереднього циклу. У одному циклі випробувань типова циклограма виконувалась двічі підряд без перерви за часом. Циклограма випробувань складалася відповідно до вибраної методики і схеми дослідження.

рення наступних операцій – вимірювання кутової швидкості у вихідному статичному положенні \vec{U}_1 (2 хв) – розворот ТВГ у азимуті до наступного статичного положення \vec{U}_2 осі чутливості ТВГ (5÷15 с) – вимірювання кутової швидкості у положенні \vec{U}_2 (2 хв) – і так далі (рис. 2). Вимірювання у вихідному положенні повторювались так, що типова циклограма випробувань через вимірювання кутових швидкостей U_i виглядала як

$$U_1 - U_2 - U_3 - U_4 - U'_1 - U_5 - U_6 - U''_1, \quad (1)$$

де U'_1 і U''_1 – повторно виміряні кутові швидкості у вихідному положенні осі чутливості ТВГ. Таким чином отримувались вибірки із загальним часом вимірювання 16 хв. Стандартна вибірка одного такого циклу випробувань із осередненням за 1 с виміряних ТВГ значень кутової швидкості представлена на рис. 3.

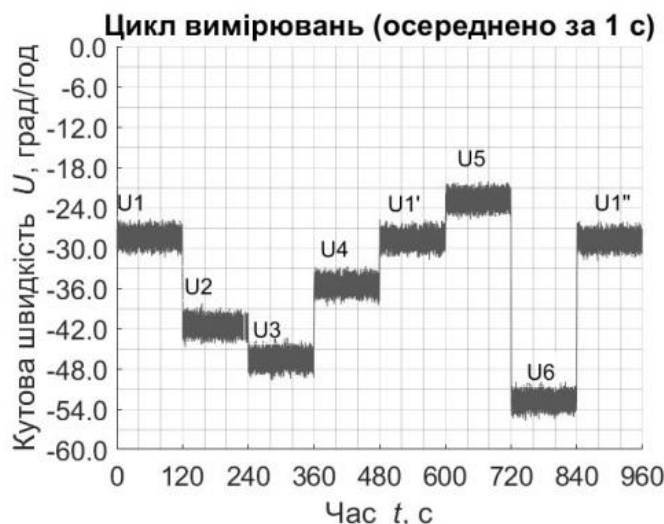


Рис. 3. Стандартна вибірка одного циклу випробувань ТВГ

Калібрування ТВГ до початку випробувань не проводилось – значення зміщення нуля U_0 та масштабний коефіцієнт k не визначались. Застосована методика аналітичного визначення істинного азимуту заданого напрямку та широти місцеположення об'єкта передбачає інваріантність до значень зміщення нуля U_0 і масштабного коефіцієнту k ТВГ.

Значення A істинного азимуту заданого напрямку, вихідного напрямку \vec{U}_1 осі вимірювання ТВГ (рис. 2), інваріантне до зміщення нуля U_0 та до масштабного коефіцієнту k ТВГ, обчислювалось як

$$A = \operatorname{arctg} \frac{U_4 - U_2}{U_1 - U_3}, \quad (2)$$

де U_1, U_2, U_3, U_4 – кутові швидкості, виміряні у площині горизонту за статичних положеннях $\vec{U}_1, \vec{U}_2, \vec{U}_3, \vec{U}_4$ (рис. 2) осі чутливості ТВГ.

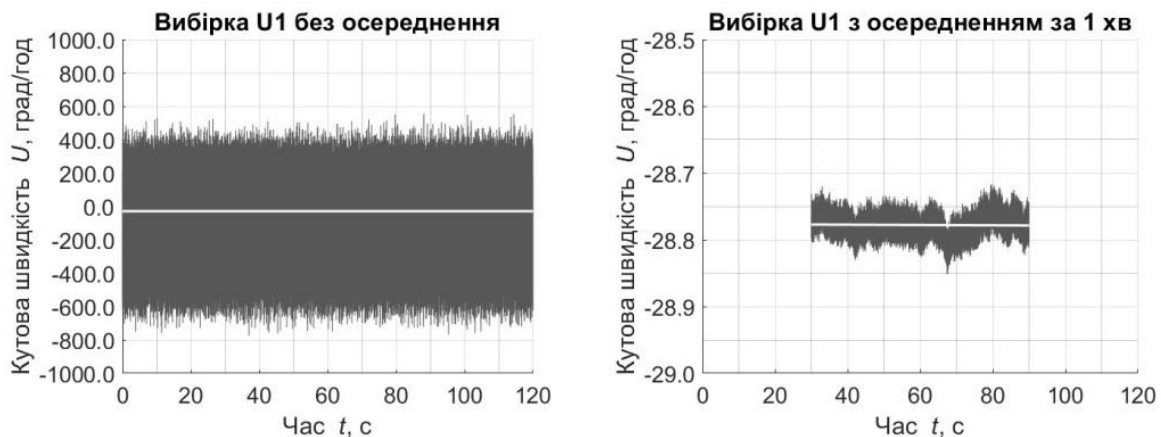
Аналогічно, значення широти φ місцеположення об'єкта (ТВГ), інваріантне до зміщення нуля U_0 та до масштабного коефіцієнту k ТВГ, обчислювалось як

$$\varphi = \arctg \frac{U_5 - U_6}{U_1 - U_3} \cos A, \quad (3)$$

де U_5, U_6 – кутові швидкості, виміряні у вертикальній площині за статичних положеннях \vec{U}_5, \vec{U}_6 (рис. 2) осі чутливості ТВГ, A – істинний азимут вихідного напрямку \vec{U}_1 осі вимірювання ТВГ, обчислений згідно (2).

Результати визначення істинного азимуту заданого напрямку

Значення вимірних кутових швидкостей U_1, U_2, U_3, U_4 для обчислення істинного азимуту A отримувались із загальної вибірки (рис. 3) під час обробки кожної двохвилинної вибірки окремо, для кожного статичного положення осі вимірювання ТВГ у площині горизонту. Значення для подальших обчислень визначалось для кожної двохвилинної вибірки як середнє значення кутових швидкостей, отриманих після попереднього осереднення за 1 хв всіх значень вибірки. Типові значення кутової швидкості, виміряної при горизонтальному статичному положенні осі чутливості ТВГ, для двохвилинної вибірки без та із попереднім осередненням за 1 хв показані на рис. 4, а) і рис. 4, б) відповідно.



а)

б)

Рис. 4. Типова двохвилинна вибірка у разі горизонтального статичного положення \vec{U}_1 ТВГ, де а) без попереднього осереднення вимірних даних, б) з попереднім осередненням за 1 хв

Для наведеного прикладу (рис. 4) середньоквадратичні значення σ_U відхилення від середнього значення U кутової швидкості U_1 без та із попереднім осередненням за 1 хв відповідно склали:

$$U \pm \sigma_U = -28,78 \pm 253,8^\circ/\text{год} \quad U \pm \sigma_U = -28,78 \pm 0,018^\circ/\text{год}. \quad (4)$$

Оскільки визначення іншими технічними засобами значення істинного азимуту A осі чутливості ТВГ під час його вихідному положенні \vec{U}_1 є складною технічною задачею, точність визначення істинного азимуту A заданого напрямку \vec{U}_1 оцінювалась по сходженню результатів визначення істинного азимуту у всіх циклах випробовування. Середнє значення істинного азимуту A , визначене із розрахованих згідно (2) значень A_i для кожного i -того циклу випробовування, включно із запусками між циклами, і значення середньоквадратичної похибки σ_A визначення азимуту склали

$$A \pm \sigma_A = 18,887 \pm 0,506^\circ. \quad (5)$$

Для порівняння, під час розрахунків для одного включення ТВГ (не враховуючи складові похибки між запусками) розкид значень (σ_A) менший, наприклад, для циклів до і після 300 год перерви у випробовуванні:

$$A' \pm \sigma'_A = 19,284 \pm 0,301^\circ; \quad A'' \pm \sigma''_A = 18,489 \pm 0,310^\circ. \quad (6)$$

Із урахуванням відомої широти $\varphi = 50,429^\circ$ випробування ТВГ, середньоквадратичні похибки (5) і (6) визначення істинного азимуту досліджуваним одноосьовим ТВГ ТВГ-43 можна записати як:

$$\sigma_A = 0,322^\circ \cdot \text{sec}\varphi; \quad \sigma'_A = 0,197^\circ \cdot \text{sec}\varphi; \quad \sigma''_A = 0,193^\circ \cdot \text{sec}\varphi. \quad (7)$$

Результати визначення широти місцеположення об'єкта

Широта місцеположення об'єкта відома, широта $\varphi = 50,429^\circ$ місця випробовування ТВГ. Тому, окрім середньоквадратичного значення випадкової похибки σ_φ , оцінюється абсолютна похибка $\Delta\varphi$ визначення широти. Значення широти місцеположення об'єкта за виміряними ТВГ значеннями кутових швидкостей U_1, U_3, U_5, U_6 та визначеному згідно (2) значенню істинного азимуту A напрямку \vec{U}_1 розраховувалося згідно виразу (3). Типові значення кутової швидкості, які вимірюються у разі вертикального статичного положення осі чутливості ТВГ, для двохвилинної вибірки без та із попереднім осередненням за 1 хв показані на рис. 5, а) та рис. 6, б) відповідно.

Для наведеного прикладу (рис. 5) середньоквадратичні значення σ_U відхилення від середнього значення U кутової швидкості U_6 без та із попереднім осередненням за 1 хв відповідно склали

$$a) U \pm \sigma_U = -52,63 \pm 251,9^\circ/\text{год}, \quad б) U \pm \sigma_U = -52,61 \pm 0,018^\circ/\text{год}. \quad (8)$$

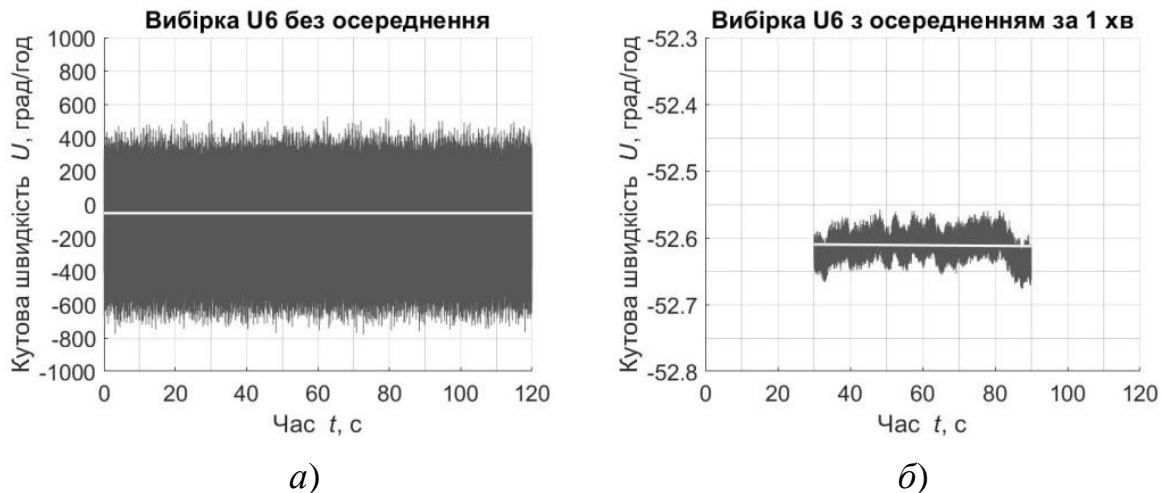


Рис. 5. Типова двохвилинна вибірка при вертикальному статичному положенні \vec{U}_6 ТВГ, де а) без попереднього осереднення вимірних даних б) із попереднім осередненням за 1 хв

Із урахуванням всіх циклів випробувань, проведених до 300-годинної перерви, середнє значення φ визначеної широти, середнє значення похибки $\Delta\varphi$ визначення широти та середньоквадратичне значення його випадкового розкиду σ_φ :

$$\varphi = 56,070^\circ; \quad \Delta\varphi = 5,641^\circ; \quad \sigma_\varphi = 0,448^\circ \quad (9)$$

Якщо отримане середньоквадратичне значення випадкової похибки σ_φ очікуване, то отримане значення абсолютної похибки $\Delta\varphi$ неприпустимо значне. Значення випадкової похибки σ_φ вказує на те, що абсолютній похибці $\Delta\varphi$ притаманний систематичний характер. Для гіпотетичного визначення джерела систематичної похибки та розробки можливої методики її компенсації проведено дослідження стабільності зміщення нуля та стабільності масштабного коефіцієнту в усіх циклах випробувань, проведених до 300-годинної перерви. Застосована схема ДКШ, що сканує у горизонтальній і вертикальній площині (рис. 2) та вибрана циклограма (1) випробувань дозволяють визначити зміщення нуля U_0 та масштабний коефіцієнт k ТВГ, значення і похибки яких оцінювались окремо для кутових швидкостей, вимірних під час статичного положення осі чутливості ТВГ у площині горизонту ($U_{0Г}, k_G$) та по вертикалі місця ($U_{0В}, k_B$):

$$\begin{aligned} U_{0Г} \pm \sigma_{0Г} &= -38,15 \pm 0,46^\circ/\text{год}; & U_{0В} \pm \sigma_{0В} &= -37,87 \pm 0,46^\circ/\text{год}; \\ k_G \pm \sigma_G &= 1,021 \pm 0,051; & k_B \pm \sigma_B &= 1,280 \pm 0,021. \end{aligned} \quad (10)$$

Із (10) випливає, що зміщення нуля $U_{0Г}$ і $U_{0В}$, нестабільність зміщення нуля $\sigma_{0Г}$ і $\sigma_{0В}$ та нестабільність масштабного коефіцієнту σ_G і σ_B ТВГ корелюються між собою для всіх двохвилинних вибірок якісно і кіль-

кісно для горизонтального і для вертикального положення осі чутливості ТВГ. Із (10) виявлена різниця між масштабними коефіцієнтами k_r і k_b у разі горизонтального і вертикального положення осі чутливості ТВГ відповідно, яка для всіх циклів вимірювання має систематичний характер:

$$k = k_r / k_b \pm \sigma_k = 0,797 \pm 0,058. \quad (11)$$

У подальшому значення широти φ місцеположення об'єкта (ТВГ) обчислювалось як

$$\varphi = \arctg \left(k \frac{U_5 - U_6}{U_1 - U_3} \right) \cos A, \quad (12)$$

де k – постійний коефіцієнт (11), визначений під час налаштування ТВГ. Під час визначення широти згідно (12) із урахуванням всіх циклів випробувань, проведених до 300-годинної перерви, середнє значення φ визначеної широти, середнє значення похибки $\Delta\varphi$ визначення широти та середньоквадратичне значення його випадкового розкиду σ_φ :

$$\varphi = 50,435^\circ; \quad \Delta\varphi = 0,006^\circ = 00'20''; \quad \sigma_\varphi = 0,483^\circ, \quad (13)$$

а після 300-годинної перерви:

$$\varphi = 49,744^\circ; \quad \Delta\varphi = 0,685^\circ = 41'06''; \quad \sigma_\varphi = 0,119^\circ, \quad (14)$$

із урахуванням всіх циклів випробувань до і після 300-годинної перерви:

$$\varphi = 50,089^\circ; \quad \Delta\varphi = 0,340^\circ = 20'23''; \quad \sigma_\varphi = 0,492^\circ. \quad (15)$$

Із урахуванням відомих широти $\varphi = 50,429^\circ$ випробування ТВГ та істинного азимуту $A = 18,887^\circ$ (5) вихідного положення осі чутливості при випробуваннях ТВГ, значення середньоквадратичної похибки σ_φ (15) можна записати як [10]:

$$0,222^\circ \cdot \sec \varphi \sqrt{1 + \cos^2 A}. \quad (16)$$

Висновки

Отримане в умовах, наближених до нормальних, середньоквадратичне значення $0,32^\circ \cdot \sec \varphi$ похибки визначення істинного азимуту заданого напрямку підтверджує потенційну можливість застосування ТВГ в системах орієнтації і визначення курсу (*attitude heading reference system*). Отримана середня похибка $0,34^\circ$ визначення широти місцеположення об'єкта із середньоквадратичним значенням $0,22^\circ \cdot \sec \varphi \cdot \sqrt{(1 + 2\cos^2 A)}$ її розкиду корелюється з очікуваною. Для компенсації систематичної складової похибки визначення широти місцеположення об'єкта рекомендовано застосування постійного коефіцієнту у разі обчислення широти, визначеним за попе-

реднім налаштуванні ТВГ. Ефективність такої компенсації підтверджена експериментально. Враховуючи те, що система управління ТВГ має можливості щодо довільного розвороту стоячої хвилі у його чутливому елементі для мінімізації систематичних похибок зміщення нуля та масштабного коефіцієнту [10] є перспектива вдосконалення методу сканування азимутального кута однокомпонентним гірокомпасом у статичному режимі.

Список використаної літератури

1. Чиковані В. В., Головач С. В. Стан та перспективи розвитку вібраційної гіроскопії в Україні та у світі. // Механіка гіроскопічних систем. Науково-технічний збірник. Вип. 41 (2021). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 61-87.
2. BlueNaute® – Gyrocompass, Attitude & Heading Reference System, Inertial Navigation System for maritime applications. Technical specifications. – Paris, France: Safran Sagem. Доступне посилання: <https://www.safran-group.com/products-services/bluenaute-gyrocompass-attitude-heading-reference-system-inertial-navigation-system-maritime>.
3. Anschütz gyro compass Standard 22 NX. Technical Date. – Kiel, Germany: Raytheon Anschütz GmbH. Доступне посилання: <https://www.anschuetz.com/what-we-do/product-range/standard-22-nx-gyro-compass>.
4. Anschütz gyro compass Standard 30 MF. Technical Date. – Kiel, Germany: Raytheon Anschütz GmbH. Доступне посилання: <https://www.anschuetz.com/what-we-do/product-range/standard-30-mf-gyro-compass>.
5. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. – IEEE std.1431TM–2004. – 79 p.
6. Low-Cost CVG for High-Grade North Finders & Targeting Systems. – Dublin, Ireland: InnaLabs. Доступне посилання: <https://www.innalabs.com/low-cost-cvg-for-high-grade-north-finders-targeting-systems>.
7. Чиковани В. В., Яценко Ю. А. Исследование точности измерения азимута кориолисовым вибрационным гироскопом с металлическим резонатором. // XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. – Санкт-Петербург: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2010. – С. 26-31.
8. Аврутов В. В. Автономное определение начальной широты с помощью инерциально-измерительного модуля // Прикладна механіка. – Київ, 2018. – 54, № 5. – С. 116-122.

9. Аврутов В. В., Рижков Л. М. Про метод автономного визначення довготи та широти рухомого об'єкту // Прикладна механіка. – Київ, 2021. – 57, № 1. – С. 115-120.
10. Заморський О. В. Про автономне визначення широти місцеположення об'єкта однокомпонентним аналітичним гіроскопічним компасом. // Механіка гіроскопічних систем. Науково-технічний збірник. Вип. 41 (2021). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 132-138.
11. Chikovani V., Golovach S. Rate Vibratory Gyroscopes bias minimization by the standing wave angle installation. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2020. – P.706-709.