

УДК 629.7.05

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771442022284623>

О. М. Бондаренко¹, *к.т.н., доцент*, Ю. О. Яценко², *к.т.н.*,
В. А. Коваленко³, *к.т.н.*

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ХВИЛЬОВОГО ГІРОСКОПУ

Ua Описано простий та зрозумілий принцип дії твердотільного хвильового гіроскопу. Представлено вирази, які дозволяють визначити конструктивні та фізичні параметри, які забезпечують необхідну полосу пропускання та діапазон вимірювання гіроскопу в режимі датчика кутової швидкості. Запропоновано ітераційний метод балансування резонатора, який дозволяє одержати найкращі параметри резонатора для конкретних застосувань в навігаційних системах. Описано послідовність налаштувань контуру системи керування твердотільного хвильового гіроскопу в режимі датчика кутової швидкості.

En A simple and clear principle of operation of a solid-state wave gyroscope is described. Expressions are presented that allow determining the design and physical parameters that provide the required bandwidth and measurement range of the gyroscope in the angular velocity sensor mode. An iterative resonator balancing method is proposed, which allows obtaining the best resonator parameters for specific applications in navigation systems. The sequence of settings of the circuit of the control system of the solid-state wave gyroscope in the mode of the angular velocity sensor is described.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

³ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Вступ

Твердотільний хвильовий гіроскоп (ТХГ) володіє простою технологією виготовлення, зрозумілими методиками настроювання та високою чутливістю до вимірюваної кутової швидкості. У літературі [1] на основі спрощень математичної моделі твердотільного гіроскопу запропоновано практичні вирази, які дозволяють одержати функцію перетворення датчика кутової швидкості як із компенсаційним режимом роботи, так і режимом датчика кута (вільного гіроскопу). У літературі [2] встановлено зв'язок між діапазоном вимірювання гіроскопу та його конструктивними параметрами, а також запропоновано схему керування гіроскопом. У доповіді [3] описано практично одержану конструкцію датчика на базі твердотільного хвильового гіроскопу із напівсферичним кварцовим резонатором, та запропоновано схему для його роботи в режимі кута, яка дає можливість підняти діапазон вимірювання. Однак не зазначено, як це вплине на полосу пропускання та стійкість до механічних навантажень. На інтернет-ресурсі компанії «Елміз» [4] представлений серійний зразок датчика кутової швидкості на базі коріолісового вібраційного гіроскопу (із металевим резонатором) та його характеристики. У доповіді [5] представлено практична програмна реалізація одного із контурів системи керування коріолісового вібраційного гіроскопу. У джерелі [6] розглянуто можливості мініатюризації напівсферичних неметалевих резонаторів твердотільного хвильового гіроскопу за рахунок використання складуваних технологій. Таким чином, розробка та виготовлення твердотільних хвильових гіроскопів із використанням різних технологій – від звичайних токарно-механічних до мікромеханічних є одним із найшвидших шляхів навіть для невеликих підприємств долучитися до ринку навігаційних приладів, як це представлено в статтях [3, 4]. Розуміння окремих особливостей розроблення таких гіроскопів дозволить оцінити їх можливості та одержати прилади із якомога кращими характеристиками.

Постановка задачі

Для отримання на базі твердотільного хвильового гіроскопу навігаційного приладу високої точності необхідно використати сучасні підходи до його розроблення. Необхідно будувати цифрову систему керування, яка дозволить на рівні простих програмних кодів здійснювати фазове автопідстроювання частоти із програмно задаваною стабільністю. Для балансування резонатору потрібно визначити простий ітераційний підхід, який дозволить повністю контролювати процес балансування, мінімізувати величину нульового сигналу гіроскопу та забезпечити задану стабільність коефіцієнту перетворення. На сьогодні існує проблема досягнення необхідного для навігаційних приладів діапазону вимірювання за збереження висо-

кої стабільності характеристик. Необхідно виконати математичний опис цієї проблеми та способи її вирішення на основі сучасних технологій. Водночас із цим потрібно визначити методи налаштування полоси пропускання гіроскопу та інших характеристик гіроскопу в умовах цифрового контуру керування зворотним зв'язком.

Конструкція чутливого елемента

Резонатор має вигляд пружної вісесиметричної оболонки, яка наближено розглядається як пружне нерозтяжне кільце [1]. Більшість приладів мають напівсферичний резонатор (рис. 1) на ніжці із плавленого кварцу, ситалу або іншого матеріалу, що володіє малим коефіцієнтом втрат (високою добротністю) у разі коливань та малим температурним коефіцієнтом частоти [5]. Власні стоячі коливання резонатору володіють певною інерцією, тому відстають у просторі від повороту основи (рис. 1). Відставання можна одержати за рахунок суми збуреного коливання та умовного вторинного (Коріолісового) коливання під кутом 45° по відношенню до форми збуреного коливання. Величина амплітуди Коріолісового коливання є мірою кутової швидкості основи.



Рис. 1. Напівсферичний резонатор

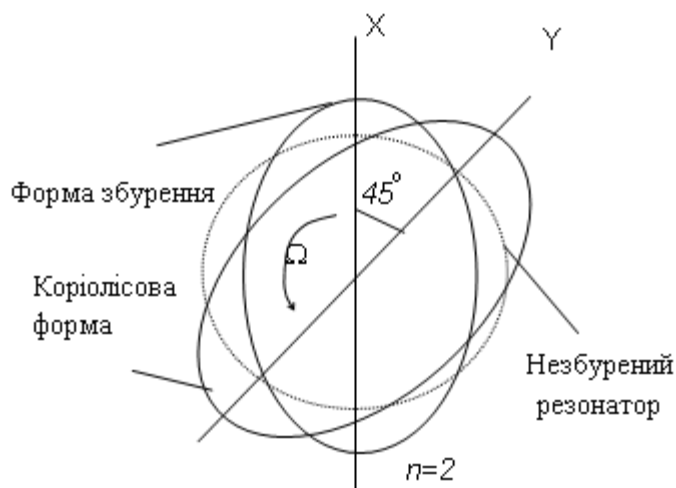


Рис. 2. Поворот збуреної форми коливань Ω – кутова швидкість основи, n – форма коливань

Друга форма коливань резонатору $n = 2$ із двома вузловими діаметрами підтримується за допомогою системи керування гіроскопу. Описати виникнення вторинних коріолісових коливань можна також через дію Коріолісових сил F_1, F_2, F_3, F_4 (рис. 3) у пучностях первинної збуреної форми стоячих коливань.

Напівсферичний резонатор розміщується над вісьмома електродами (рис. 4), які відстоять один від одного на кут 45° . Електродам надаються назви для опису зв'язку між елементами електричної і механічної частин системи керування.

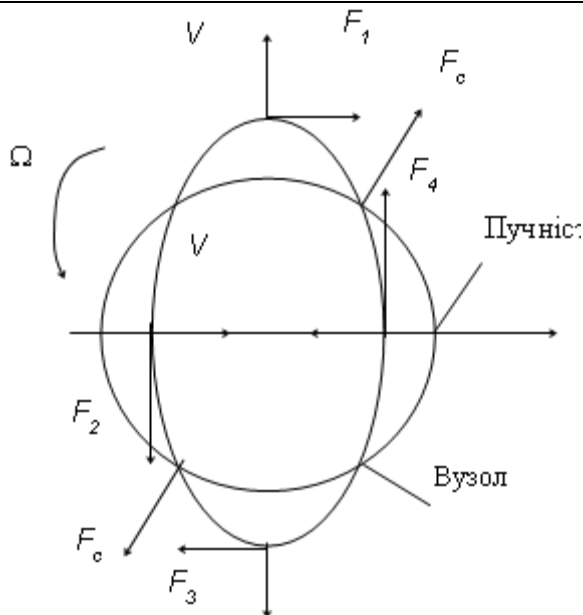


Рис. 3. Дія Коріолісових сил на резонатор

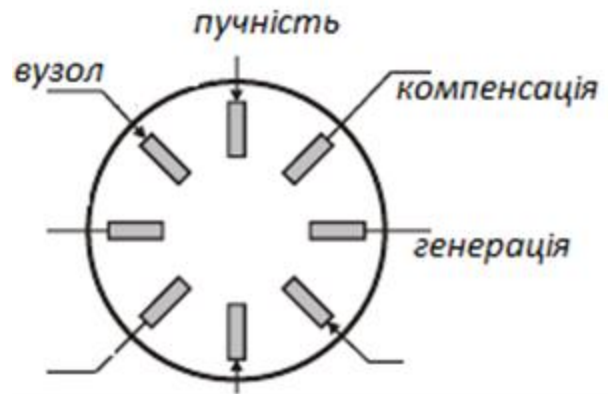


Рис. 4. Схема розміщення електродів системи керування

На рис. 3 F_1, F_2, F_3, F_4 – Коріолісові сили у пучностях коливань, F_C – сумарні Коріолісові сили, V – відносна швидкість коливань, Ω – переносна кутова швидкість основи

У пучності здійснюється вимірювання амплітуди коливань первинної стоячої хвилі [1] із тим, щоб потім підтримувати задану амплітуду подачею напруги на електроди генерації. У вузлу вимірюється амплітуда вторинної стоячої хвилі, викликаної коріолісовим прискоренням, з тим, щоб її компенсувати за допомогою електродів компенсації.

Діапазон вимірювання ТХГ

Сила, необхідна для компенсації коріолісової сили [1],

$$f_y = -\omega_x c_{x_0} \left(2\pi\Omega + \Delta \frac{1}{\tau} \sin 2\theta_\tau \right) \sin \omega_x t - c_{x_0} \omega \Delta \sin 2\theta_\omega \cos \omega_x t, \quad (1)$$

де ω_x – частота коливань резонатору у пучності,

c_{x_0} – коефіцієнт сили збурення коливань,

$$c_{x_0} = \frac{f_{x_0}/2\omega_x}{\sqrt{\frac{1}{\tau_x^2} + (\omega_x - \omega_f)^2}};$$

$\tau = 2Q/\omega$ – декремент затухання коливань,

Q – добротність коливань резонатору,

ω – середня частота коливань резонатору,

$\Delta\omega$ – середня різночастотність коливань резонатору,

ω_{f_x} – частота дії сили збурення коливань,

θ_τ – кут різнодобротності коливань,

θ_ω – кут різночастотності коливань,

$\Delta \frac{1}{\tau}$ – різнодобротність коливань,

f_{x_0} – сила збурення коливань в пучності.

Якщо відкинути впливи різночастотності та різнодобротності, то другий та третій доданок виразу (1) дорівнюватиме нулю, а напруга, необхідна для збурення коливань ΔU_y [2], дорівнюватиме

$$\Delta U_y = \frac{8kQ\Omega}{\omega_x} U_x = K_\Omega \Omega . \quad (2)$$

Тепер, якщо добротність резонатора складатиме $Q = 1$ млн., частота коливань 5 кГц, то за кутової швидкості у 1 рад/с, напруга, необхідна для контуру компенсації у 2000 разів має перевищувати амплітуду напруги у точці генерації. Таке можливо лише у разі суттєвого зменшення зазору між електродами та резонатором і визначатиметься рівнем технології виготовлення елементів ТХГ – електродів та резонатору. Розрахунки показують можливість при напругі компенсації до 200 В забезпечити діапазон вимірювання кутової швидкості не менше 150 град/с, номінальне значення нульового сигналу на рівні 50 град/год.

Балансування резонатору

Дисбаланс (по 4-й формі) [1] дає стійку форму коливань резонатора, яка не збігається із напрямом збурення стоячої хвилі у резонаторі (рис. 5). Тому максимальні амплітуди вихідного сигналу не попадають на електроди реєстрації сигналу пучності, а є досить великі сигнали на електродах осі вузлів.

Балансування резонатору має повернути максимальну амплітуду його коливань (у разі відсутності вимірюваної кутової швидкості) у точку пучності і зменшити різницю резонансних частот між пучністю та вузлом. Це дозволяє, згідно із (1), зменшити вплив наводок від фази генерації у сигналі компенсації. Також під час балансування необхідно зменшити різнодобротність коливань між пучністю та вузлом, що дозволить зменшити нульовий сигнал гіроскопу, та відповідно абсолютне значення температурного впливу на нульовий сигнал гіроскопу. Під час балансування видаляється маса за певною схемою (рис. 6):

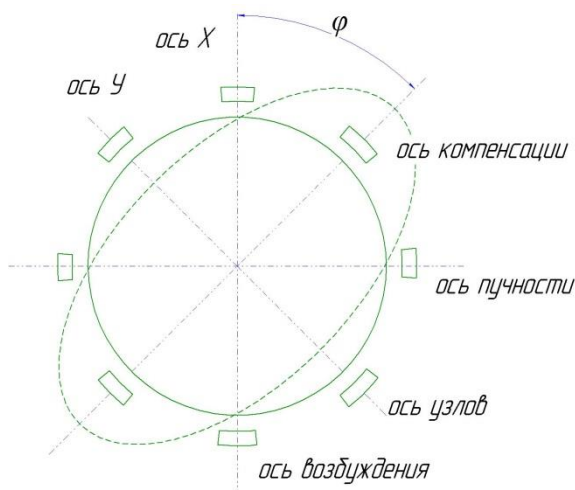


Рис. 5. Схема відхилення хвилі

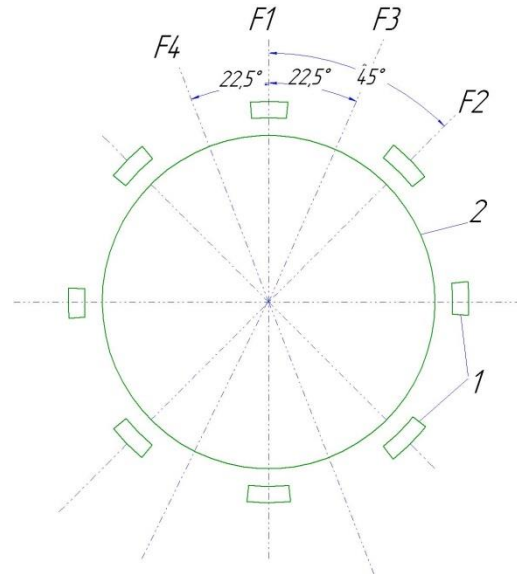


Рис. 6. Схема видалення маси

етап 1 – вимірювання параметрів дисбалансу, нульового сигналу гіроскопу,

етап 2 – механічне видалення маси по осях балансування $F1 \dots F4$.

Маса видаляється на етапі 2 однаково по чотирьох точках на поверхні резонатора, що віддаляються один від одного в окружному напрямку на $\Delta\varphi = 90^\circ$: у позиції $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$.

На перших ітераціях усувається різниця частот при збудженні осі $F1$ і осі $F2$. На других ітераціях усувається різночастотність осі $F3$ і осі $F4$ існуючого дисбалансу 4-ї форми.

Кут положення форми дисбалансу визначається за співвідношеннями амплітуд сигналів, що виходять з електродів по осі пучності (реєстрації коливань пучності) та осі вузлів.

Вхідний контроль до балансування резонатори мають пройти по початковій різночастотності, яка має не перевищувати одиниць Гц, та добротності, яка має складати не менше 1 млн. Після балансування має забезпечуватись різночастотність в соті долі герцу, кут форми дисбалансу долі градусу, різнодобротність не більше декількох сотих долей відсотка.

Налаштування системи керування

У загальному випадку до складу ТХГ входить резонатор, датчик розгойдування, датчик переміщення, електронний вузол обробки сигналу, а також корпусні, опорні і допоміжні деталі [2]. Система керування гіроскопу складається із контуру генерації коливань та контуру компенсації (рис. 7). Під час коливань резонатора внаслідок зміни ємності в пучності виникає змінна електрична напруга.

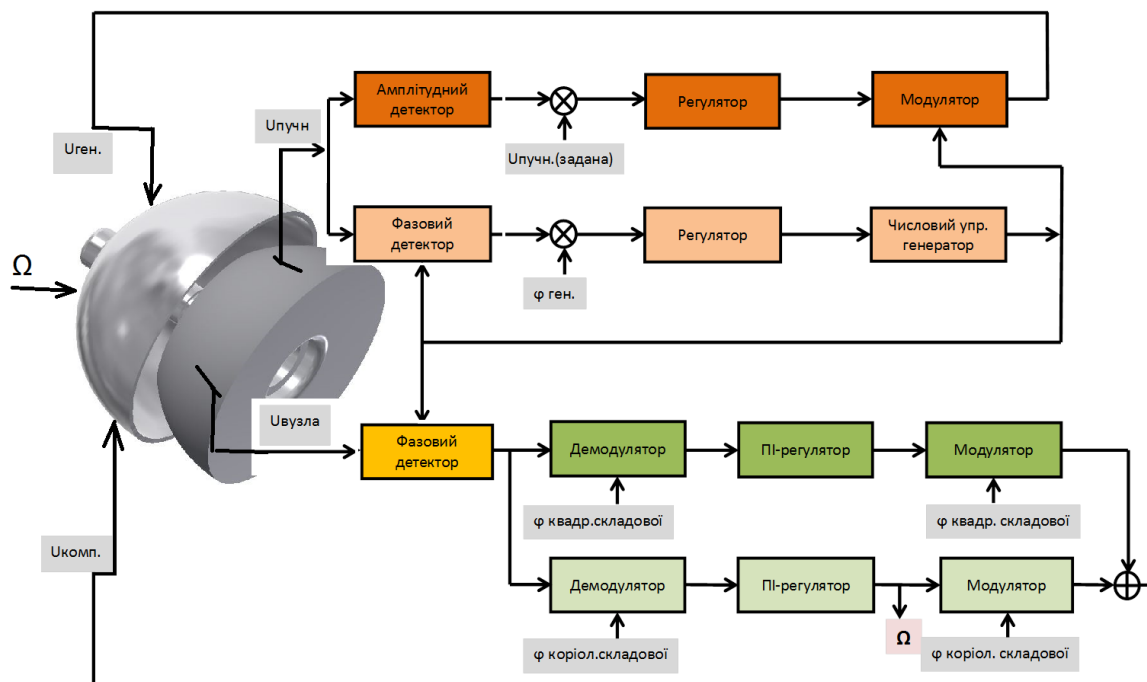


Рис. 7. Структурна схема системи керування гіроскопу

Амплітуда змінної напруги за допомогою амплітудного детектору перетворюється в постійний сигнал амплітуди напруги, яка порівнюється на від'ємному суматорі із заданою U -пучн. Якщо амплітуда коливань відрізняється від заданої, то різниця амплітуд через ПІ-регулятор та модулятор знову подається на електрод генерації, змінюючи відповідно амплітуду коливань і вихідну напругу в пучності до того часу, поки та не зрівняється із заданою. Тоді генерація здійснюватиметься із заданою амплітудою з малою похибкою $10^{-7} \dots 10^{-9}$ В.

Для стабілізації частоти передбачений контур фазового автопідстроювання частоти. Для цього фазовий детектор перетворює зсув фази коливань в пучності відносно фази генерації в постійну напругу, яка порівнюється із заданою напругою, яка є еквівалентом заданої фази $\varphi_{\text{ген}}$. У разі наявності відмінності фази від заданої, числовий керований генератор починає змінювати частоту генерації до тих пір, поки фаза коливань пучності не співпадатиме із заданою.

Для настроювання гіроскопу необхідно знати телеметрію коливань резонатора (зліва направо на рис. 8): напругу компенсації Коріолісової сили – вона ж вихідна напруга гіроскопу, температуру плати, частоту коливань резонатора, амплітуду збурення коливань, квадратурні наводки, корисний вихідний сигнал, помилка демодуляції, амплітуда напруги у пучності, амплітуда напруги у вузлу, фаза демодуляції та фаза модуляції сигналів контуру керування.

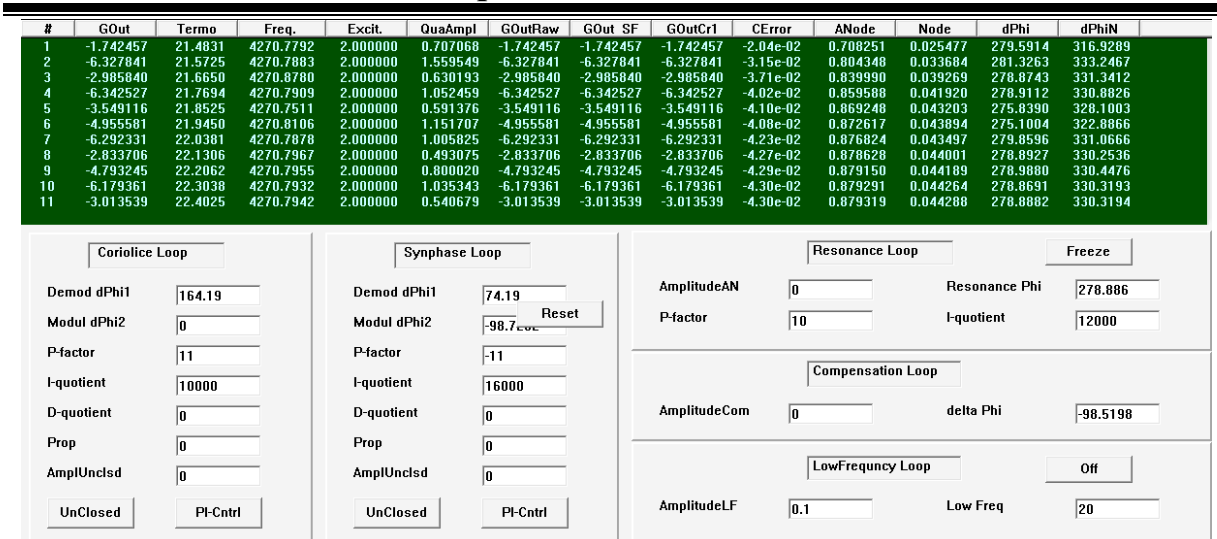


Рис. 8. Телеметрія настроювання

Під час фазового автоналагодження частоти (ФАНЧ) необхідно зазначити стартові частоти в цифровому контурі керування, які максимально близькі до власної частоти коливань резонатору, та яким температурам відповідають ці частоти (рис. 9, а). Такі визначення суттєво зменшують термін готовності гіроскопу після запуску. Для алгоритмічної компенсації впливу температури на коефіцієнт перетворення та нульовий сигнал гіроскопу, задаються (рис. 9, б) параметри (коефіцієнти) моделі корекції.

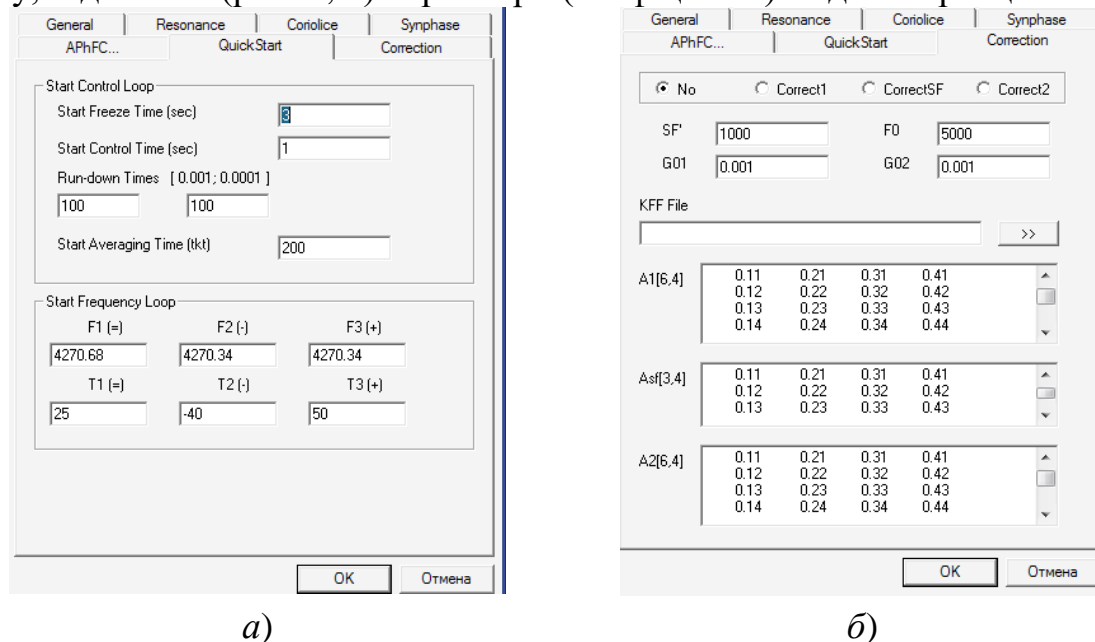


Рис. 9. Настроювання: а) контуру фазового автопідстроювання частоти, б) температурних коефіцієнтів моделі корекції

Завдаються задані фазові зміщення для демодулятора та модулятора контуру генерації (рис. 10, а), щоб ФАНЧ підтримувала ту частоту коливань резонатору, за якої найвища добротність. Завдаються задані фазові зміщення для демодулятора та модулятора контуру компенсації

(рис. 10, б), для забезпечення синхронного детектування корисного сигналу

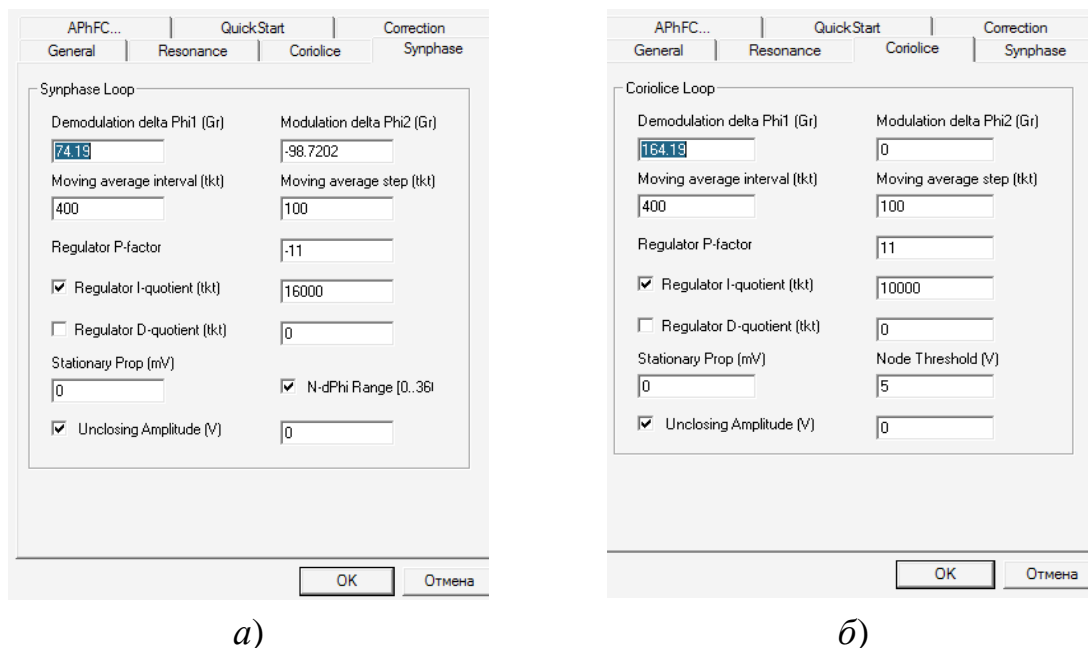


Рис. 10. Настроювання: а) контуру генерації,
б) контуру компенсації

Можливість підбору фаз як демодулятора, так і модулятора сигналів контуру генерації та контуру компенсації, дозволяє більш тонко і гнучко сформувати співвідношення між фазами сигналу опорного сигналу, сигналу генерації (має відставати орієнтовно на 180 градусів) та сигналу компенсації (має відставати від сигналу генерації орієнтовно на 90 градусів). Здійснюється стабілізація частоти числового керуючого генератора та завершується стабілізація швидкості коливань у пучності. Після настроювання контуру генерації амплітуда коливань пучності та фаза демодуляції фіксуються у програмному коді системи керування. Стабільність швидкості коливань пучності, яка є добутком амплітуди коливань та частоти коливань, забезпечує необхідну стабільність коефіцієнту перетворення гіроскопу.

Для перевірки якості настроювання ПД-регулятора використовується метод оцінки реакції на ступінчате збурення у контурі керування (рис. 11, а).

Одиничне збурення можна задавати програмно, подавши стрибок сигналу (рис. 11, б) на електрод генерації або компенсації, у залежності від того, який контур у системі керування настроюється.

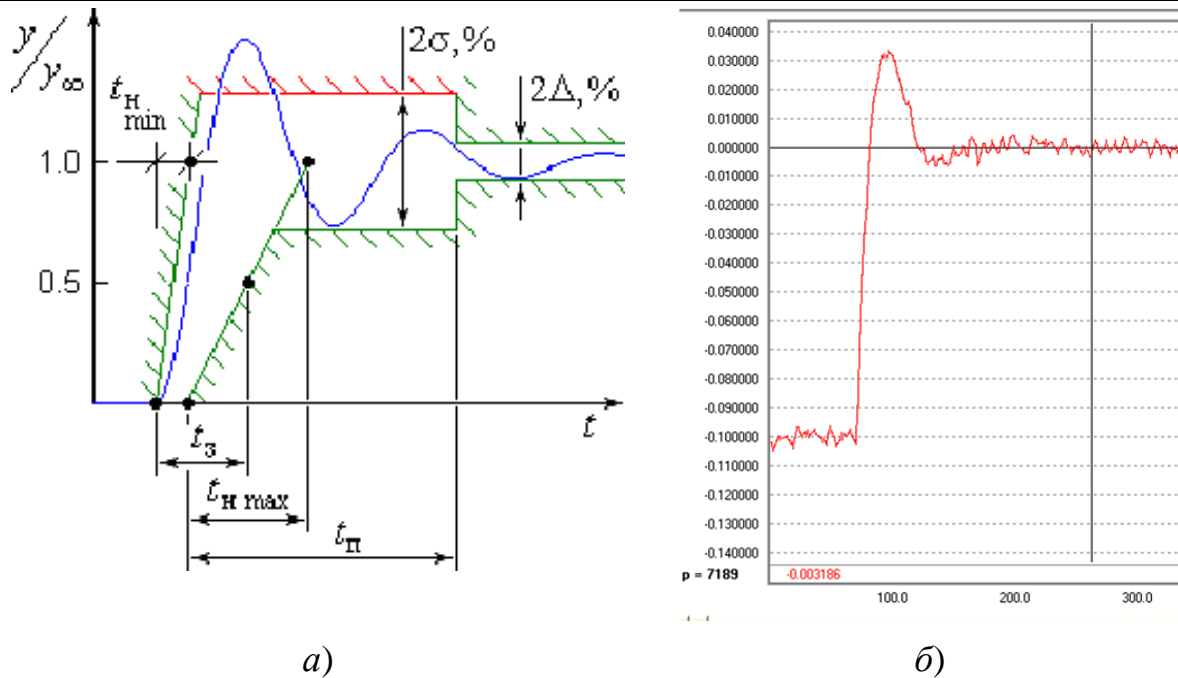
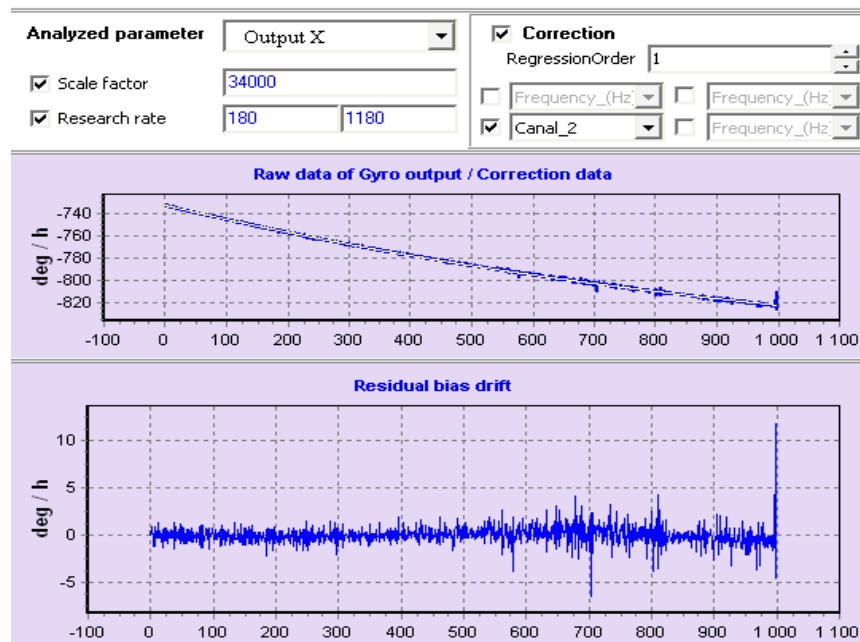
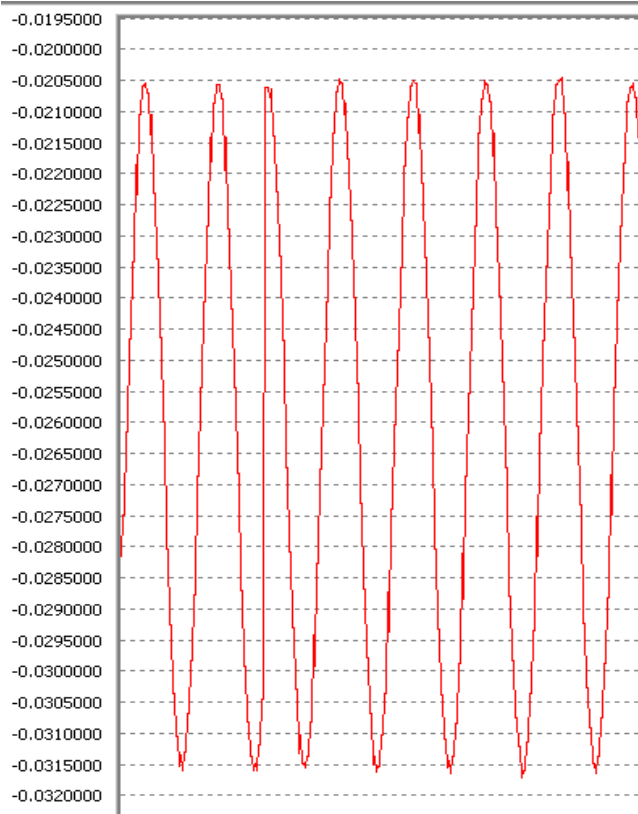


Рис. 11. Перевірка параметрів ПІД-регулятора: а) допустима область значень параметрів перехідного процесу, б) реакція на одиничне збурення в контурі керування

Ефективність роботи системи температурної корекції може складати сотні разів у разі правильному підборі коефіцієнтів моделі (рис. 12, а) та забезпечувати нестабільність вимірювання кутової швидкості не вище сотих часток градуса за годину в широкому спектрі зовнішніх впливів.



а)



б)

Рис. 12. Перевірка ефективності системи налаштування: а) перевірка моделі корекції, б) перевірка полоси пропускання

Перевірку полоси пропускання можна здійснити по падінню амплітуди коливань напруги на електроді вузла (рис. 12, б) під час програмного імітування на електроді компенсації сигналу змінної частоти та фіксованої амплітуди коливань. Налаштуванням параметрів ПД-регуляторів у режимі реального часу при імітуванні вимірюваної величини забезпечується полоса пропускання гіроскопу від 30 до 70 Гц.

Висновки

Досвід розроблення твердотільних хвильових гіроскопів показав можливість швидко отримати сучасний прилад високої точності для навігаційних систем. Використання цифрових систем керування дозволяє на рівні простих програмних кодів побудувати фазове автопідстроювання частоти зі стабільністю 10^{-9} , достатній для вимірювання кутової швидкості із похибкою тисячних часток градусів. Оригінальний підхід до ітераційного балансування резонатору в низці однакових точок дозволив повністю контролювати процес балансування, забезпечити як малу величину та нестабільність реального нульового сигналу гіроскопу, так і високу стабільність коефіцієнту перетворення. Для вирішення експериментально виявлених проблем твердотільних хвильових гіроскопів із високою стабільним кварцо-

вим резонатором, пов'язаних або із малим діапазоном вимірювання, або вузькою смугою пропускання, необхідно зменшувати розміри чутливого елемента із використанням сучасних мікромеханічних технологій. Тоді при зазорах у 20 ... 30 мкм між електродами системи керування коливаннями резонатора, допустимій електричній напрузі компенсації 50...100 В вдасться забезпечити необхідний для навігаційних приладів діапазон вимірювання кутової швидкості (150 град/год), полосу пропускання (50 Гц) та нестабільність вимірювання (0,01 град/год) в усіх умовах експлуатації.

Список використаної літератури

1. *Lynch D.* Coriolis vibratory gyroscope. // Symposium of gyrotechnologies. – Stuttgart, Germany – 1998. – 15 p.
2. *Бондаренко О. М., Савлук О. О.* Система керування коріолісового вібраційного гіроскопу // Тези доповідей 11 Міжнародної науково-технічної конференції «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки»: К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 27-30.
3. Practical development of inertial orientation and navigation systems for solid-state wave gyroscopes / A. V. Trebukhov et al, // XXIII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. - St. Petersburg: Central Research Institute "Elektropribor". – 2016. – P. 68-77.
4. Гіроскопи та навігаційні системи [Інформаційний ресурс] Режим доступу <http://www.elmiz.com/product-category/gyroscopes-and-navigation-systems-ukr/>
5. *Головач С. В.* Автоматизація визначення фазності амплітуди вузла та пучності циліндричного металевого резонатора у складі твердотілого вібраційного гіроскопа / С. В. Головач, Г. Ю. Строкач // XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 17–18 травня 2022 р., Київ, Україна : збірник матеріалів конференції. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 16–19.
6. High sensitivity rate-integrating hemispherical resonator gyroscope with dead area compensation for damping asymmetry || Wanliang Zhao¹, HaoYang, Fucheng Liu, Yan Su¹, Chong Li // Scientific Reports. 2021. – 12 p. [Інформаційний ресурс] Режим доступу: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-80885-y>.