



Безвесільна О. М.,
Цірук В. Г.,
Ткачук А. Г.,
Просюк А. О.,
Самсонова Н. В.,
Хомяк О. М.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СТЕЖЕННЯ КОРІОЛІСОВОГО ГІРОСКОПА ЗА РЕЗОНАНСНОЮ ЧАСТОТОЮ

У статті розглянуто новий коріолісовий гіроскоп (КВГ) — датчик кутової швидкості (ДКШ) системи стабілізації навігаційного комплексу сучасної легкої броньованої техніки. Розроблено систему стеження КВГ за резонансною частотою. Зазначені датчики мають широку галузь застосування, у тому числі — стабілізації платформ із установленими на них вимірювальними пристроями й у системах керування рухомими об'єктами різного класу.

Ключові слова: коріолісовий гіроскоп, резонансна частота, датчик кутової швидкості.

1. Вступ

До КВГ сьогодні пред'являються високі вимоги для забезпечення необхідної точності системи стабілізації навігаційного комплексу легкої броньованої техніки. На ПАТ «НВО «КЗА ім. Г. І. Петровського» розроблено новий високоточний КВГ.

Конструкція резонатора КВГ має бути такою, яка забезпечує ідентичність двох мод коливань (первинної і вторинної). Оскільки у цьому випадку забезпечується максимальна точність, то КВГ має відноситись до другого класу гіроскопів. Конструкція має осьову симетрію. Існують дві геометричні фігури, що мають високу осьову симетрію: сфера і циліндр. Сфера (або півсферична оболонка) має максимальну осьову симетрію і на основі цієї геометричної фігури створено півсферичні кварцові КВГ, які в іноземній літературі скорочено називають HRG (Hemispherical Resonator Gyroscope). Резонатор цього гіроскопа має добротність 5–10 мільйонів і збуджується електростатичними (безконтактними) електродами. Такий резонатор не технологічний у виробництві і, як наслідок, дорогий у виготовленні, його складно балансувати і для балансування потрібно дороге устаткування [1, 2].

У літературі, однак, не досліджено питання розробки системи стеження КВГ за резонансною частотою, що надзвичайно важливо для забезпечення необхідної точності. Цим обґрунтовується актуальність даного дослідження.

2. Постановка завдання

Щоб отримати максимально високу точність і чутливість КВГ, його резонатор повинен збуджуватись на резонансній частоті. Проте, у процесі роботи резонансна частота змінюється через дію температури, а також через зміну жорсткості резонатора, що обумовлено втотою матеріалу. Ці ефекти вимагають розробки системи стеження за резонансною частотою так, щоб сигнал збудження коливань резонатора мав резонансну частоту у момент його подання на резонатор.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — система стеження КВГ за резонансною частотою.

Метою статті є розробка системи стеження КВГ за резонансною частотою.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити структурну схему ФАПЧ.
2. Розглянути динаміку коливань резонатора.
3. Провести аналіз точності стеження КВГ за резонансною частотою.

4. Аналіз літературних даних

Проведені дослідження показали, що великий внесок у теорію та практику гіроскопічних чутливих елементів, датчиків кутової швидкості, систем стабілізації в СНД було зроблено низкою видатних вчених: А. О. Одинцовим, Б. Б. Самотокіним, О. В. Збруцьким, М. А. Павловським, В. В. Карачуном, В. В. Чіковані [2] та іншими. Однак, у відомій літературі не досліджено питання розробки системи стеження КВГ за резонансною частотою.

У роботі [3] запропоновано використовувати для тривимірного аналізу роботи рухомих платформ на основі гіроскопів метод кватерніонів.

У роботі [4] проведено аналіз рівняння руху авіаційної гравіметричної системи (АГС), чутливим елементом якої є гіроскопічний гравіметр. Узагальнено теорію і принципи побудови прецизійних гіроскопічних гравіметрів. Описано проведені експериментальні дослідження АГС із використанням гіроскопічного гравіметра з цифровою обробкою інформації.

У роботі [5] запропоновано використовувати МЕМС-технології у проектуванні сучасних гіроскопів.

У роботах [6–8] описано роботу п'єзоелектричного гіроскопа та принцип стеження за резонансною частотою. Досліджено залежність зміни резонансної частоти від впливу температури зовнішнього середовища.

У роботах [9, 10] викладено теорію і принципи побудови системи ударо- і віброзахисту чутливих елементів

стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки. Описано будову цифрового КВГ та розглянуто його чутливий елемент.

5. Система фазового автопідстроювання частоти

Одна із основних систем КВГ є автогенератор. Зазвичай, налаштування контуру позитивного зворотного зв'язку формується так, щоб сума коефіцієнтів посилення по усьому ланцюгу зворотного зв'язку дорівнювала одиниці. Така система швидко знаходить резонансну частоту і стійко утримує її при температурних і інших варіаціях резонансної частоти. Недоліком автогенератора є великі шуми. Тому для точних приладів використовують інші системи стеження за резонансною частотою. Однією із найчастіше використовуваних систем є система фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). ФАПЧ складається з трьох основних блоків: фазовий детектор, контролер і генератор керування напругою (ГКН) (у цифровому виконанні управляється кодом). Структурна схема ФАПЧ і її підключення до чутливого елемента представлена на рис. 1.

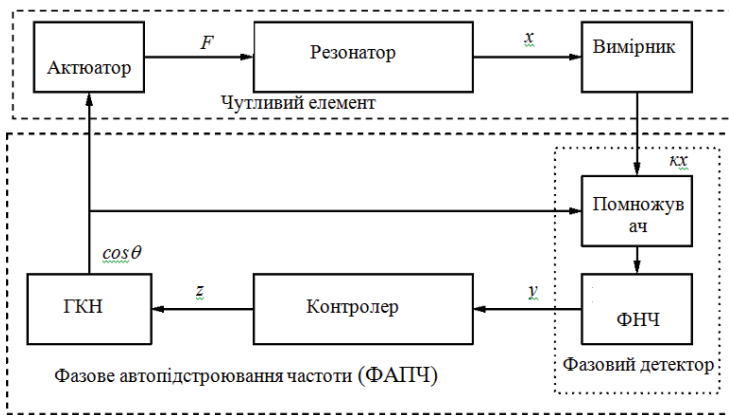


Рис. 1. Структурна схема ФАПЧ

У схемі чутливий елемент (ЧЕ) складається з резонатора, актуатора (п'єзоелемента збудження, що впливає на резонатор силою F) і вимірювача (п'єзоелемента, що вимірює відхилення резонатора від нейтрального стану). Фазовий детектор реалізується, як демодулятор, що складається з помножувача на опорну частоту і фільтра низької частоти (ФНЧ). ГКН синтезує частоту пропорційно напрузі, що подається на його вхід.

Динаміка коливань резонатора описується рівнянням другого порядку:

$$\ddot{x} + c\dot{x} + \omega_r^2 x = F, \tag{1}$$

де x — відхилення резонатора від нейтрального положення, c — нормований (на масу) коефіцієнт демпфірування, ω_r — резонансна частота, F — сила, що збуджує резонатор, діє від п'єзокераміки збудження. Ця сила може бути представлена у вигляді:

$$F = A \cos \theta, \tag{2}$$

де θ — миттєва фаза ГКН, $\cos \theta$ — вихідний сигнал ГКН, A — амплітуда сили, визначена параметрами п'єзокераміки і системою стабілізації амплітуди коливань $A = V\omega/g_{31}$, V — електрична напруга, що подається на п'єзокераміку, ω — ширина п'єзокераміки, g_{31} — п'єзоелектрична постійна.

6. Система автоматичного регулювання підсилення

ФАПЧ гарантує захоплення резонансної частоти, якщо початкова частота ГКН ω_0 досить близька до резонансної частоти ω_r . У зв'язку з тим, що ω_r є локальним максимумом, то, чим ближче ω_0 до ω_r , тим надійніше і швидше відбудеться захоплення резонансної частоти системою ФАПЧ. Крім того, за умови близькості ω_0 до ω_r , параметри ФАПЧ можна настроїти на вузьку смугу захоплення частоти, мінімізуючи при цьому шум ФАПЧ, а отже — максимізувати точність стеження.

Одним із можливих і досить ефективних способів завдання початкової частоти ГКН, при включенні КВГ на будь-якій температурі з робочого діапазону, є введення у систему управління автогенератора (рис. 2) як допоміжного елемента [2]. У діапазоні від 0,1 до 0,4 с

роботи автогенератора визначається частота резонансу з похибкою не більше 0,1 Гц. Виміряна частота передається на ГКН ФАПЧ в якості ω_0 . Далі, автогенератор відключається і ФАПЧ, впродовж часу не більше 0,5 с, надійно захоплює резонансну частоту, тому що початкова частота ГКН $\omega_0 \approx \omega_r$. При цьому, сумарний час виходу КВГ на режим вимірювання при будь-якій температурі з робочого діапазону не перевищує 1 с.

Смуга пропускання ФАПЧ і перехідні процеси визначаються, в основному, параметрами контролера. При роботі ФАПЧ поблизу резонансної частоти її роботу можна з достатньою точністю описати лінеаризованими рівняннями. З цією метою слід отримати передатну функцію лінеаризованої ФАПЧ. На рис. 3 представлена блок-схема, до складу якої входить ЧЕ, демодулятор в якості фазового детектора, контролер (регулятор) і ГКН. Була отримана передатна функція ЧЕ, до складу якої увійшов демодулятор. Тому демодулятор у складі ФАПЧ можна виключити з розгляду і перетворити блок-схему на рис. 1 у блок-схему на рис. 3.

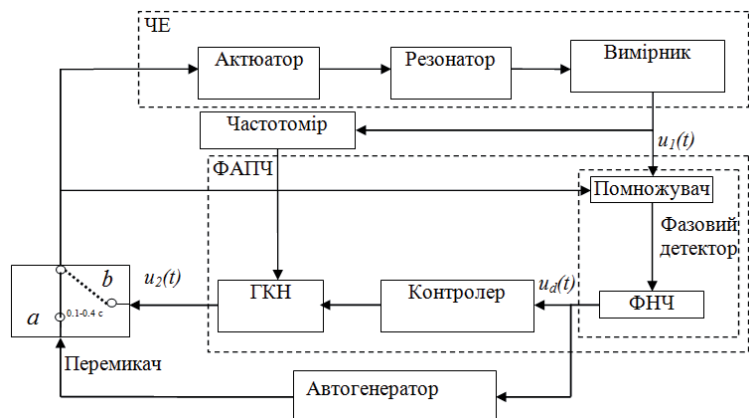


Рис. 2. Блок-схема ФАПЧ із запуском від автогенератора



Рис. 3. Блок-схема ФАПЧ і ЧЕ з модулятором-демодулятором

7. Аналіз точності стеження за частотою

Час пошуку резонансної частоти залежить від того, наскільки точно задається її початкове значення. Чим ближче початкове значення частоти ГКН до резонансної частоти, тим швидше і точніше ФАПЧ її знаходить. На рис. 4 приведений графік залежності різниці між резонансною частотою і частотою збудження при невідомій резонансній частоті, тобто початкове значення частоти ГКН дорівнює нулю (використано передатну функцію ФАПЧ без фазового детектора [9, 10]).

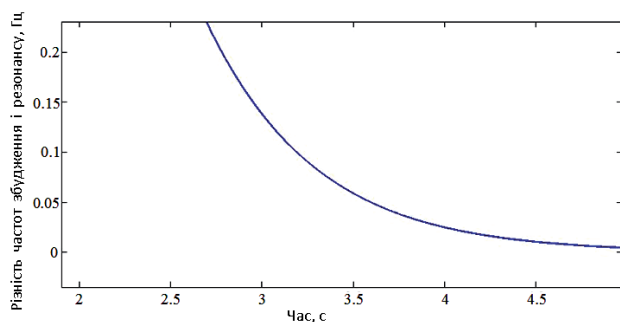
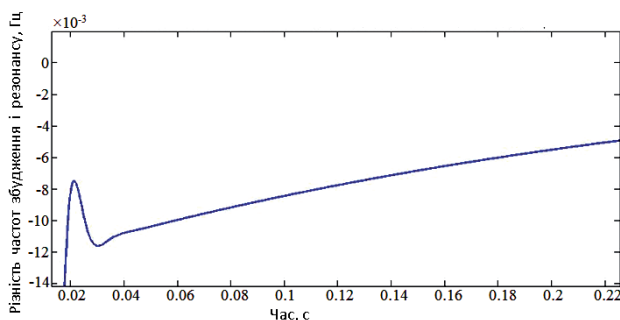


Рис. 4. Вихід на резонанс при початковій частоті ГКН рівній нулю

Частота збудження ГКН досягає резонансу з похибкою менше 0,01 Гц тільки за 4,5 с.

На рис. 5 зображено графік тієї ж залежності при початковій частоті ГКН, що відрізняється від резонансної на 0,5 Гц. Вже на 20-тій мс відмінність резонансної частоти від частоти збудження дорівнює 0,01 Гц. Так, щоб ФАПЧ швидко захоплював резонансну частоту, слід спочатку запускати автогенератор, вимірювати частоту резонансу в режимі автогенератора, а потім перемикається на ФАПЧ, задаючи ГКН вимірну частоту резонансу.

Рис. 5. Вихід на резонанс при початковій частоті f_{res} — 0,5 Гц

На рис. 6 показано перехідний процес ФАПЧ при стрибкоподібній зміні частоти резонансу від дії зовнішніх збурень.

Час встановлення режиму стеження за резонансною частотою з похибкою не більше 0,01 Гц дорівнює 60 мс.

На рис. 7 представлені графіки вхідного шуму АЦП і буфера, середньоквадратичне значення якого приведене до частоти, рівне $\sigma_{вх} = 0,5$ Гц в частотному діапазоні до 50 кГц і шуму на виході резонатора, СКВ якого рівне $\sigma_{вих} = 0,02$ Гц. Коефіцієнт пригнічення шумів АЦП і буфера дорівнює $0,5/0,02 = 25$.

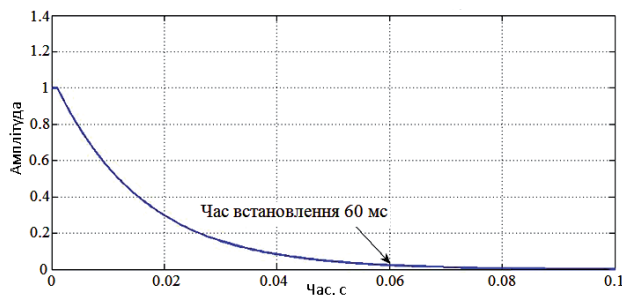


Рис. 6. Час встановлення точного стеження за частотою після удару

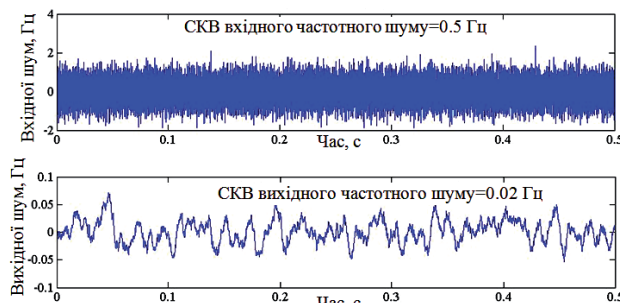


Рис. 7. Пригнічення ФАПЧ шумів АЦП і буфера

На рис. 8 показано шум на виході резонатора при вхідному шумі ЦАП аналогічному за параметрами шуму АЦП і буфера.

Як видно, коефіцієнт пригнічення шумів ЦАП дорівнює 25000, що значно більше, чим коефіцієнт пригнічення шумів АЦП. Тому шумам АЦП і буфера необхідно приділяти велику увагу, мінімізуючи їх засобами схемотехніки.

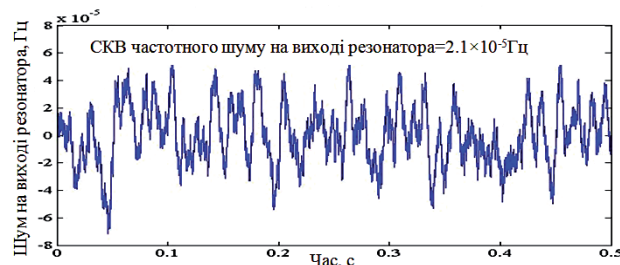


Рис. 8. Частотний шум, обумовлений шумами ЦАП

8. Висновки

В результаті проведених досліджень:

1. Розглянуто і описано коріолісовий гіроскоп, розроблений ПАТ «НВО «КЗА ім. Г. І. Петровського», побудований на основі металевого резонатора, що має високу точність та надійність.
2. Розроблено структурну схему системи фазового автопідстроювання частоти, яка складається з трьох

основних блоків: фазовий детектор, контролер і генератор керування напругою.

3. Розроблено ефективну систему стеження КВГ за резонансною частотою. Встановлено, що час пошуку резонансної частоти залежить від того, наскільки точно задається її початкове значення. Чим ближче початкове значення частоти генератора керування напругою до резонансної частоти, тим швидше і точніше фазове автопідстроювання частоти її знаходить.

Література

1. Безвесільна, О. М. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем [Текст]: монографія / О. М. Безвесільна, Ю. В. Киричук, Ю. О. Подчашинський. — Житомир: ЖДТУ, 2010. — 200 с.
2. Цірук, В. Г. Системи наведення та стабілізації озброєння [Текст]: монографія / В. Г. Цірук, О. М. Безвесільна, В. П. Квасніков, В. В. Чіковані. — Київ: НАУ, 2014. — 176 с.
3. Tadano, S. Three Dimensional Gait Analysis Using Wearable Acceleration and Gyro Sensors Based on Quaternion Calculations [Text] / S. Tadano, R. Takeda, H. Miyagawa // Sensors. — 2013. — Vol. 13, № 7. — P. 9321–9343. doi:10.3390/s130709321
4. Bezvesilnaya, E. N. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter [Text] / E. N. Bezvesilnaya, A. H. Tkachuk // Aviation. — 2014. — Vol. 18, № 3. — P. 134–140. doi:10.3846/16487788.2014.969878
5. Xia, D. The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology [Text] / D. Xia, C. Yu, L. Kong // Sensors. — 2014. — Vol. 14, № 1. — P. 1394–1473. doi:10.3390/s140101394
6. Singh, A. K. Piezoelectric Gyro Sensor Technology [Text] / A. K. Singh // Defence Science Journal. — 2007. — Vol. 57, № 1. — P. 95–103. doi:10.14429/dsj.57.1735
7. Shiratori, N. Temperature Characteristic Compensation of a Miniature Bi-Axial Gyro-Sensor Using a Disk-Type Resonator [Text] / N. Shiratori, M. Hatakeyama, S. Okada // Japanese Journal of Applied Physics. — 1999. — Vol. 38, Part 1, № 9B. — P. 5586–5591. doi:10.1143/jjap.38.5586
8. Donley, E. A. Nuclear magnetic resonance gyroscopes [Text] / E. A. Donley // Proceedings of the IEEE Sensors, Kona, HI, USA, 1–4 November 2010. — IEEE, 2010. — P. 17–22. doi:10.1109/icsens.2010.5690983
9. Цифровий кориолісівський вібраційний гіроскоп [Електронний ресурс]: Патент України № 101747 / Малярів С. П., Цірук В. Г., Ніколаєнко А. В. — № а 2011 13301; заявл. 11.11.2011; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/9-101747-cifrovijj-korolisivskijj-vibracijnijj-giroskop.html>
10. Чутливий елемент кориолісова вібраційного гіроскопа [Електронний ресурс]: Патент України № 97783 / Малярів С. П., Цірук В. Г., Ніколаєнко А. В. — № а 2011 10539; заявл. 31.08.2011; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/8-97783-chutlivijj-element-korolisova-vibracijjnogo-giroskopa.html>

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ КОРИОЛИСОВОГО ГИРОСКОПА ЗА РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТОЙ

В статье рассмотрен новый кориолисовый гироскоп (КВГ) — датчик угловой скорости (ДУС) системы стабилизации навигационного комплекса современной легкой бронированной техники. Разработана система слежения КВГ за резонансной частотой. КВГ имеют широкую область применения, в том числе, они используются для стабилизации платформ с установленными на них измерительными устройствами и в системах управления подвижными объектами различного назначения.

Ключевые слова: кориолисовый гироскоп, резонансная частота, датчик угловой скорости.

Безвесільна Олена Миколаївна, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, кафедра приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, **e-mail: bezvesilna@mail.ru**.

Цірук Віктор Григорович, кандидат технічних наук, докторант, кафедра приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, **e-mail: kza@kza.com.ua**.

Ткачук Андрій Геннадійович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, Україна, **e-mail: andrew_tkachuk@i.ua**.

Просюк Анастасія Олександрівна, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, Україна, **e-mail: nastua2008@inbox.ru**.

Самсонова Ніна Вікторівна, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, Україна, **e-mail: andrew_tkachuk@i.ua**.

Хомяк Олександр Миколайович, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, Україна, **e-mail: andrew_tkachuk@i.ua**.

Безвесильная Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, кафедра приборостроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина. **Цірук Віктор Григорьевич**, кандидат технических наук, докторант, кафедра приборостроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Ткачук Андрей Геннадьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий, Житомирский государственный технологический университет, Украина.

Просюк Анастасия Александровна, кафедра автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий, Житомирский государственный технологический университет, Украина.

Самсонова Нина Викторовна, кафедра автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий, Житомирский государственный технологический университет, Украина.

Хомяк Александр Николаевич, кафедра автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий, Житомирский государственный технологический университет, Украина.

Bezvesilna Olena, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, **e-mail: bezvesilna@mail.ru**.

Tsyruk Victor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, **e-mail: andru_tkachuk@ukr.net**. **Tkachuk Andriy**, Zhytomyr State Technological University, Ukraine, **e-mail: andrew_tkachuk@i.ua**.

Prosyuk Anastasia, Zhytomyr State Technological University, Ukraine, **e-mail: nastua2008@inbox.ru**.

Samsonova Nina, Zhytomyr State Technological University, Ukraine, **e-mail: andrew_tkachuk@i.ua**.

Khomyak Alexander, Zhytomyr State Technological University, Ukraine, **e-mail: andrew_tkachuk@i.ua**