

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

О.В. ПЕТРЕНКО, М.В. ІЛЬЧЕНКО

Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики»

ІНТЕГРУЮЧИЙ РЕЖИМ ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА З МЕТАЛЕВИМ ЦИЛІНДРИЧНИМ РЕЗОНАТОРОМ

Коріолісовий вібраційний гіроскоп (КВГ) є одним із останніх найдосконаліших приладів, що відноситься до гіроскопічних технологій. Ця технологія за достатньо короткий час розповсюдилася по всьому світу не тільки тому, що продемонструвала якості, що відсутні у інших конкуруючих, в основному оптичних технологій (волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) та кільцевих лазерних гіроскопах (КЛГ)), але і тому, що технологія КВГ, на відміну від ВОГ та КЛГ, піддається мікромініатюризації. Це призвело до створення мікромеханічних гіроскопів (МЕМС гіроскопів). В роботі наведено режими КВГ, в яких він може використовуватись: 1. Режим роботи без зворотного зв'язку, коли хвиля, збуджена силами Коріоліса, амплітуда якої пропорційна вимірюваній кутовій швидкості, не керується. При обертанні кут повороту хвилі пропорційний кутовій швидкості обертання. 2. Режим роботи зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збуджену силами Коріоліса. У цьому випадку сигнал зворотного зв'язку пропорційний вимірюваній кутовій швидкості. 3. Диференціальний режим роботи, коли зворотні зв'язки, компенсуючі Коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. У цьому випадку виникають два сигнали, в яких кутлова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки, рівні в обох сигналах. Додатково розглянуто режим роботи Коріолісового вібраційного гіроскопа в якості датчика кута. На основі узагальненої математичної моделі КВГ, розроблено структурну схему системи керування, що забезпечує роботу вібраційного гіроскопа в інтегруючому режимі, коли КВГ вимірює кут повороту в інерціальному просторі. Структурна схема реалізована в Matlab-Simulink і представлена результатами моделювання як вихідного сигналу інтегруючого КВГ, так і траєкторії руху матеріальної точки на резонаторі.

Ключові слова: вібраційний гіроскоп, резонатор, математична модель.

E.N. BEZVESILNA

National Technical University of Ukraine «Kyiv polytechnic institute of the name Igor Sikorski»

O.V. PETRENKO, M.V. ILCHENKO

Public joint stock company «Research-and-Production association «Kyiv automatics plant»

THE INTEGRATING MODE OF OSCILLATION GYROSCOPE IS WITH A METALLIC CYLINDRICAL RESONATOR

The Coriolis oscillation gyroscope (KVG) is one of the last most perfect devices, that behaves to gyroscopic technologies. This technology for short enough time spread all over the world not only because showed qualities, that absent at other competitive, mainly optical, technologies (fiber-optic gyroscopes (VOG) and circular laser gyroscopes (KLG)), but also because technology of KVG, unlike VOG and KLG, is added a miniaturization. It resulted in creation. The modes of KVG, which he can be used in, are in-process resulted: 1. Office hours nonreactive, when a wave, excited forces of Coriolis, amplitude of which is proportional a measureable angulator, does not follow. At a rotation, the corner of turn of wave is proportional the angulator of rotation. 2. There are office hours ticker-coil, which compensates a wave, excited forces of Coriolis. In this case the signal of feed-back is proportional a measureable angulator. 3. Differential office hours, when reverse copulas, compensating the Coriolis wave, are kept, and additionally set the signal of management proposes an oscillation wave between electrodes. In this case there are two signals, which an angulator which is measured is in, there is their difference with opposite signs doubles the signal of angulator and compensates errors, levels in both signals. The mode of operations of the Coriolis oscillation gyroscope is additionally considered in quality the sensor of corner. On the basis of the generalized mathematical model of KVG, the flow diagram of control system, which provides work of oscillation gyroscope in the integrating mode is developed, when KVG measures the corner of turn in inertial space. A flow diagram is realized in Matlab-simulink and presented the results of design of both initial signal of integrating KVG and trajectory of motion of financial point, on a resonator.

Keywords: oscillation gyroscope, resonator, mathematical model.

Вступ

КВГ є одним із найбільш досконалих приладів останніх гіроскопічних технологій. Ця технологія за достатньо короткий час розповсюдилася по всьому світу не тільки тому, що продемонструвала якості, що відсутні у інших конкуруючих, в основному оптичних технологій (волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) та кільцевих лазерних гіроскопів (КЛГ)), але і тому, що технологія КВГ, на відміну від ВОГ та КЛГ, піддається мікромініатюризації. Це привело до створення мікромеханічних гіроскопів (МЕМС гіроскопів).

Чутливий елемент (ЧЕ) КВГ може мати або вібруючу оболонку (на півсферу, циліндр, кільце та ін.) або вібруючу пробну масу (балку, камертон, спарений камертон та ін.).

Всі типи КВГ можуть працювати у різноманітних режимах:

1. Режим роботи без зворотного зв'язку, коли хвиля, збуджена силами Коріоліса, амплітуда якої пропорційна вимірюваній кутовій швидкості, не керується. При обертанні кут повороту хвилі пропорційний кутовій швидкості обертання.

2. Режим роботи зі зворотним зв'язком, що компенсує хвилю, збуджену силами Коріоліса. У цьому випадку сигнал зворотного зв'язку пропорційний вимірюваній кутовій швидкості.

3. Диференціальний режим роботи, коли зворотні зв'язки, компенсуючі коріолісову хвилю, зберігаються, а додатково поданий сигнал керування виставляє вібраційну хвилю між електродами. У цьому випадку виникають два сигнали, в яких кутова швидкість, що вимірюється, міститься з протилежними знаками і їх різниця подвоює сигнал кутової швидкості та компенсує похибки, рівні в обох сигналах.

4. Режим роботи з компенсацією тільки квадратурної компоненти сигналу (інтегруючий режим). В інтегруючому режимі роботи сили Коріоліса не компенсуються і в результаті накладання двох хвиль: первинної та вторинної, вібраційна стояча хвиля повертається вслід за обертанням корпусу КВГ із затримкою, що рівна коефіцієнту Брайанак $\approx 0,4$.

У перших трьох режимах КВГ вимірює кутову швидкість та є датчиком кутової швидкості. В четвертому режимі КВГ вимірює кут повороту та є інтегруючим гіроскопом.

Експериментальна частина

1. Узагальнена модель КВГ. Основні рівняння руху, які описують будь-який з існуючих режимів роботи КВГ і враховують всі головні його похибки називаються узагальненою моделлю КВГ і представляються у вигляді [1]:

$$\begin{aligned}
 & -k(2\Omega\dot{y} + \dot{\Omega}y) + \frac{2}{\tau}\dot{x} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(\dot{x}\cos 2\theta_\tau + \dot{y}\sin 2\theta_\tau) + (\omega^2 - k'\Omega^2)x - \omega\Delta\omega(x\cos 2\theta_\omega + y\sin 2\theta_\omega) = f_x; \\
 & +k(2\Omega\dot{x} + \dot{\Omega}x) + \frac{2}{\tau}\dot{y} - \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)(-\dot{x}\sin 2\theta_\tau + \dot{y}\cos 2\theta_\tau) + (\omega^2 - k'\Omega^2)y + \omega\Delta\omega(-x\sin 2\theta_\omega + y\cos 2\theta_\omega) = f_y, \quad (1)
 \end{aligned}$$

де $\omega^2 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2}$; $\omega\Delta\omega = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2}$; $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)$; $\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}$.

У цих рівняннях, які описують коливання первинної моди по осі X і вторинної моди по осі Y, називаються рівняннями у швидких змінних, так як відхилення x та y від рівноважного положення резонатора по обох координатах відбуваються з частотою, близькою до резонансної. У цих рівняннях враховано, що в резонаторі є дві осі з максимальною ω_1 і мінімальною ω_2 резонансними частотами коливань. Також, є дві осі з мінімальним τ_1 і максимальним τ_2 часом загасання вільних коливань, що еквівалентно мінімальній Q_1 і максимальній Q_2 добротності резонатора, так як $\tau = 2Q / \omega$. Причому, вісь мінімальної резонансної частоти має кут θ_ω з напрямком первинних коливань, а вісь мінімальної добротності становить кут θ_τ з напрямком первинних коливань, як показано на рис. 1.

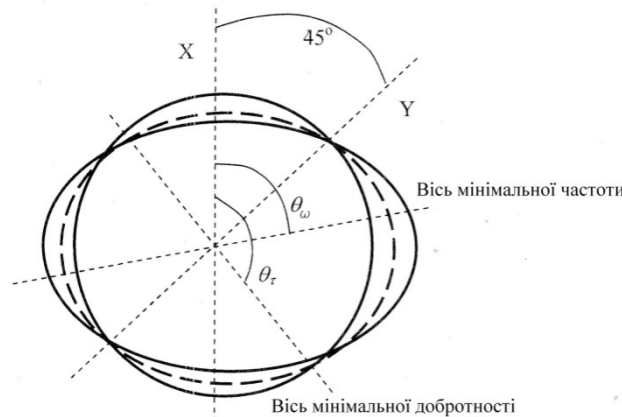


Рис. 1. Куты мінімальної частоти та добротності

У рівняннях (1) передбачені керуючі силові дії f_x та f_y по кожній з осей X і Y коливань. Крім того, враховуються члени, обумовлені наявністю кутового прискорення Ω і доцентрового прискорення Ω^2 , які при побудові системи керування хвилею не враховуються (у зв'язку з їх малістю). Дійсно, Ωx менше, ніж $\dot{x}\Omega$ у стільки разів, у скільки резонансна частота більше частоти зміни вимірюваної кутової швидкості, зазвичай приблизно в 40-50 разів, а Ω^2 менше ω^2 приблизно в 10^4 разів.

Рівняння (1) запишемо в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} - 2k\Omega\dot{y} + d_{xx}\dot{x} + d_{xy}\dot{y} + k_{xx}x + k_{xy}y &= f_x; \\
 \ddot{y} + 2k\Omega\dot{x} + d_{yx}\dot{x} + d_{yy}\dot{y} + k_{yx}x + k_{yy}y &= f_y, \quad (2)
 \end{aligned}$$

де k – коефіцієнт Брайана, $d_{xx} = 2 / \tau + \Delta(1 / \tau)\cos 2\theta_\tau$ – коефіцієнт демпфування коливань по осі X, $d_{xy} = \Delta(1 / \tau)\sin 2\theta_\tau$ – перехресне демпфування, $k_{xx} = \omega_1^2 - \omega\Delta\omega\cos 2\theta_\omega$ – нормована на масу жорсткість

резонатора по осі X , $k_{xy} = -\omega\Delta\omega\sin 2\theta_\omega$ – перехресна жорсткість, $d_{yx} = d_{xy}$, $d_{yy} = 2/\tau - \Delta(1/\tau)\cos 2\theta_\tau$ – коефіцієнт демпфування коливань по осі Y , $k_{yx} = k_{xy}$, $k_{yy} = \omega_2^2 + \omega\Delta\omega\cos 2\theta_\omega$ – нормована на масу жорсткість резонатора по осі Y .

У інтегруючому режимі роботи КВГ сила Коріоліса, яка виникає внаслідок обертання вібраційної структури, не компенсується і викликає обертання вібраційної хвилі в бік обертання резонатора. На будь-якому часовому інтервалі кут повороту хвилі пропорційний куту повороту резонатора (а разом з ним і всього гіроскопа) відносно інерційного простору.

При відсутності зовнішніх сил $f_x = f_y = 0$ і демпфування $d_{xx} = d_{yy} = d_{yx} = 0$, рівняння (2) має наступний вигляд [2]:

$$\begin{aligned} y &= a \sin \left(\theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \cos(\omega t + \varphi') - q \sin \left(\theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \sin(\omega t + \varphi'); \\ x &= a \cos \left(\theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \cos(\omega t + \varphi') - q \sin \left(\theta_0 - k \int_t^{t_0} \Omega(t') dt' \right) \sin(\omega t + \varphi'). \end{aligned} \quad (3)$$

Рівняння (3) показують, що під час відсутності зовнішніх сил і демпфування траєкторія руху матеріальної точки резонатора в процесі коливань обертається при обертанні резонатора з кутовою швидкістю Ω з відставанням по куту на коефіцієнт Брайана. Коефіцієнт Брайана для циліндра можна визначити точніше за формулою [3]:

$$k = \frac{n}{n^2 + 1 + \frac{3}{n^2} \left(\frac{r}{h} \right)^2}, \quad (4)$$

де n – номер моди коливань, $n=2$, r – радіус циліндра, h – висота циліндра.
Для циліндра діаметром 25 мм та висотою $h = 18$ мм, $k = 0,373$.

2. Структурна схема інтегруючого КВГ. За відсутності кутової швидкості Ω траєкторія руху матеріальної точки є еліпс. При обертанні гіроскопа з кутовою швидкістю Ω еліпс повертається у бік обертання. Якщо гіроскоп повернувся, наприклад, на 90° , то хвиля (велика вісь еліпса) повернеться на кут $\theta = k \cdot 90^\circ = 0,373 \cdot 90^\circ = 33,57^\circ$. Графік траєкторії точки в процесі коливань резонатора представлена на рис. 2.

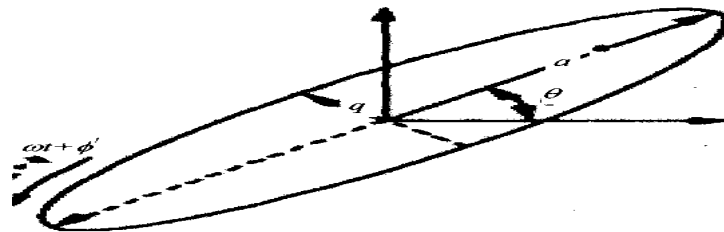


Рис. 2. Траєкторія точки в процесі коливань

При відсутності зовнішніх сил та демпфування і коли частоти двох хвиль однакові – параметри a , q , θ_0 , φ є константами, КВГ є ідеальним гіроскопом [3]. Різниця власних частот коливань, демпфування, зовнішні сили призводять до того, що параметри a , q , θ_0 , φ змінюються з часом. Ця зміна в часі відбувається значно повільніше, ніж період швидких коливань $T = 2\pi / \omega$.

Для керування хвилею КВГ повинні бути прикладені сили, які змінюються з частотами, близькими або рівними резонансній частоті і мають відповідну фазу. Для цього потрібний генератор опорної фази. Генератор опорної фази виробляє сигнали, що забезпечують прикладання сил необхідної частоти і фази, а також опорні сигнали для модуляції та демодуляції. Саме по демодульованим вихідним сигналам обчислюються оцінки параметрів a , q , θ_0 , φ .

Для того, щоб отримати прийнятну точність вимірювання кутової швидкості або кута повороту, у всіх КВГ незалежно від режимів роботи необхідний контур керування амплітудою.

У КВГ більш високої точності необхідно компенсувати величину q – квадратуру, зводячи її до нуля. Цей сигнал називається квадратурою, так як його фаза відрізняється від фази основного сигналу, пропорційного кутовій швидкості, на 90° .

Параметри a , q , θ_0 , φ можна визначити через демодуляційні змінні C_x , S_x , C_y , S_y . Співвідношення, що пов'язують демодуляційні змінні з параметрами траєкторії, визначаються наступними виразами [1]:

$$a = \sqrt{\frac{1}{2}(E + \sqrt{E^2 - Q^2})}; \quad q = \sqrt{\frac{1}{2}(E - \sqrt{E^2 - Q^2})};$$

$$E = C_x^2 + S_x^2 + C_y^2 + S_y^2; \quad Q = 2(C_x S_y - C_y S_x) \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2(C_x C_y + S_x S_y)}{C_x^2 + S_x^2 - C_y^2 - S_y^2}; \quad \varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{C_x S_x + C_y S_y}{C_x^2 - S_x^2 + C_y^2 - S_y^2}$$

Мета системи керування КВГ, що працює в інтегруючому режимі, полягає в забезпеченні наступних значень параметрів a, q, θ, φ в процесі роботи гіроскопа:

$$q=0 (Q=0), \quad a^2 = E = const, \quad \varphi=0; \quad (6)$$

Структурна схема системи керування інтегруючого варіанта КВГ представлена на рис. 3.

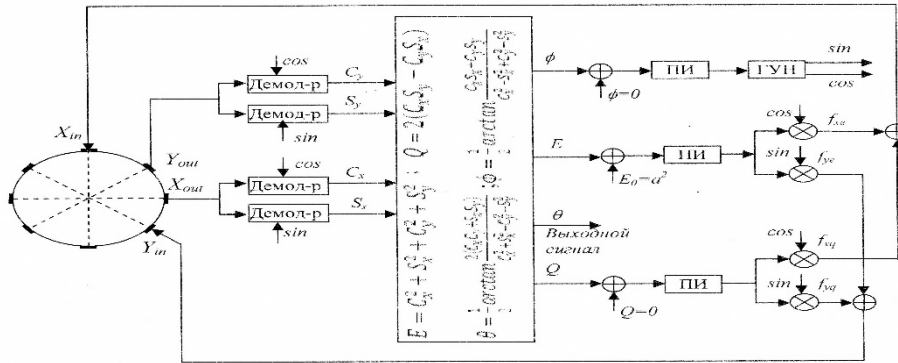


Рис. 3. Структурна схема системи керування інтегруючого КВГ

4. Simulink-модель інтегруючого КВГ. На основі структурної схеми, представленої на рис. 3, а також використовуючи Simulink-модель КВГ, що працює в режимі датчика кутової швидкості (ДКШ), представленої в роботі [4], побудована Matlab-Simulink модель інтегруючого КВГ, яка представлена на рис. 4.

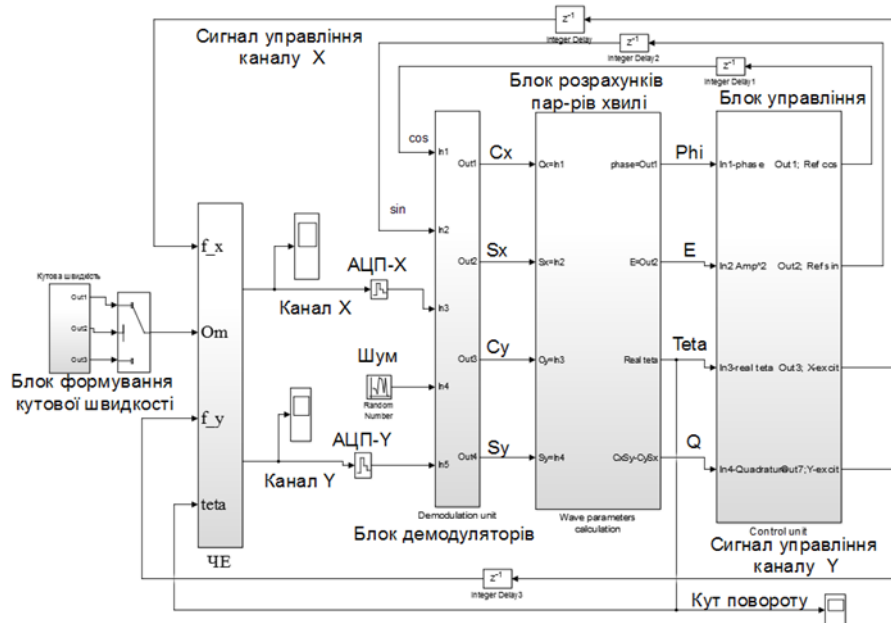


Рис. 4. Matlab-Simulink модель інтегруючого КВГ

Модель складається з 5-и блоків:

1. Блок формування кутової швидкості, що забезпечує перемикання з нульовою або постійної кутової швидкості на змінну кутову швидкість. При нульовій кутовій швидкості на вході моделі спостерігається сигнал зміщення нуля.

2. З блоку формування кутової швидкості сигнал надходить на вхід Om чутливого елемента (ЧЕ), два виходи якого формують вимірювальні канали X та Y відповідно до рішень рівнянь (1). У модель блоку ЧЕ, також вводяться такі параметри резонатора, як резонансна частота, добротність, різночастотність, різнодобротність, кути θ_τ і θ_ω . З двох виходів ЧЕ сигнали надходять на АЦП вимірювальних каналів X та Y і далі у цифровій формі надходять на блок демодуляторів.

3. Блок демодуляторів працює відповідно до структурної схеми, представленої на рис.3, тобто за допомогою опорних сигналів $\sin\omega_r t$ і $\cos\omega_r t$ резонансної частоти ω_r проводиться операція амплітудної демодуляції і формуються демодульовані змінні C_x, S_x, C_y, S_y , які надходять на блок обчислення параметрів хвилі.

4. Блок обчислення параметрів хвилі обчислює параметри $a, q(Q), \theta, \varphi$ та подає їх в блок керування.

5. Блок керування формує керуючі сигнали на електроди ЧЕ так, як показано на рис. 3.

Кут хвилі θ пропорційний куту повороту гіроскопа і являє собою вихідний сигнал інтегруючого режиму роботи КВГ. Цей сигнал формується на виході блоку обчислення параметрів хвилі і надходить на вихід гіроскопа, а також подається у блок керування для перерахунку керуючих сигналів f_x та f_y відповідно до зміненої орієнтацією хвилі щодо електродів керування хвилею.

Відмінність моделей КВГ, що реалізують різні режими роботи, полягає саме у побудові блоку керування хвилею.

Simulink-схема блоку керування хвилею інтегруючого КВГ представлена на рис. 5.

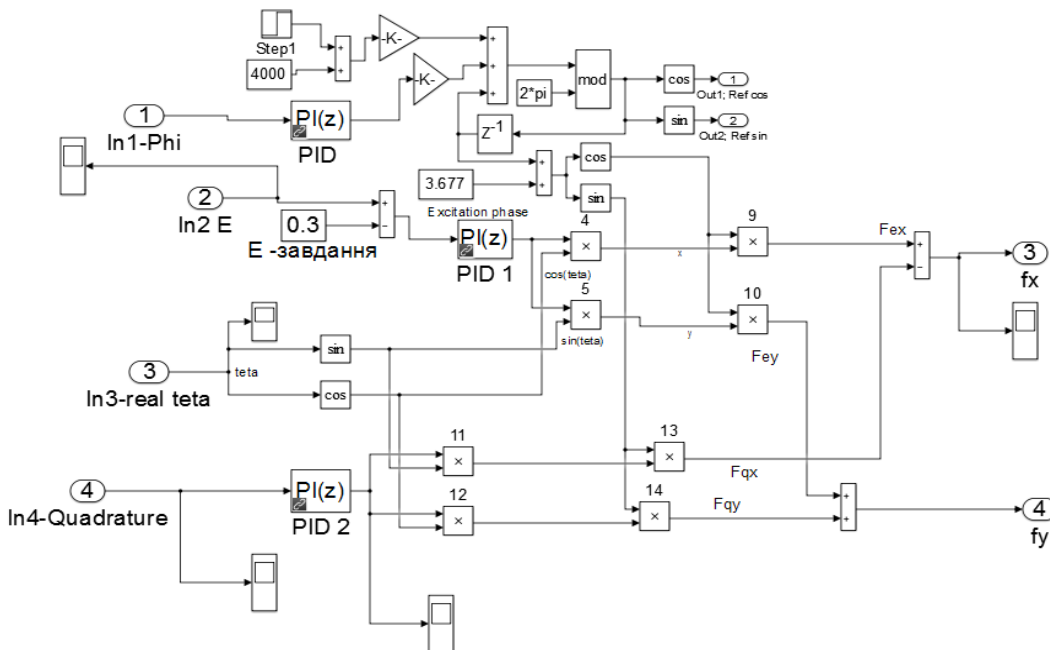


Рис. 5. Simulink-схема блоку керування хвилею інтегруючого КВГ

У цій блок-схемі, на відміну від блок-схем диференціального режиму і режиму ДКШ, використовуються 3 пропорційно-інтегруючі-диференціюючі (ПІД) регулятори для забезпечення бажаних значень параметрів хвилі φ, E , та Q , зазначених у виразах (6). Блок керування також формує опорні сигнали для модуляції сигналів керування і демодуляції виміряних сигналів.

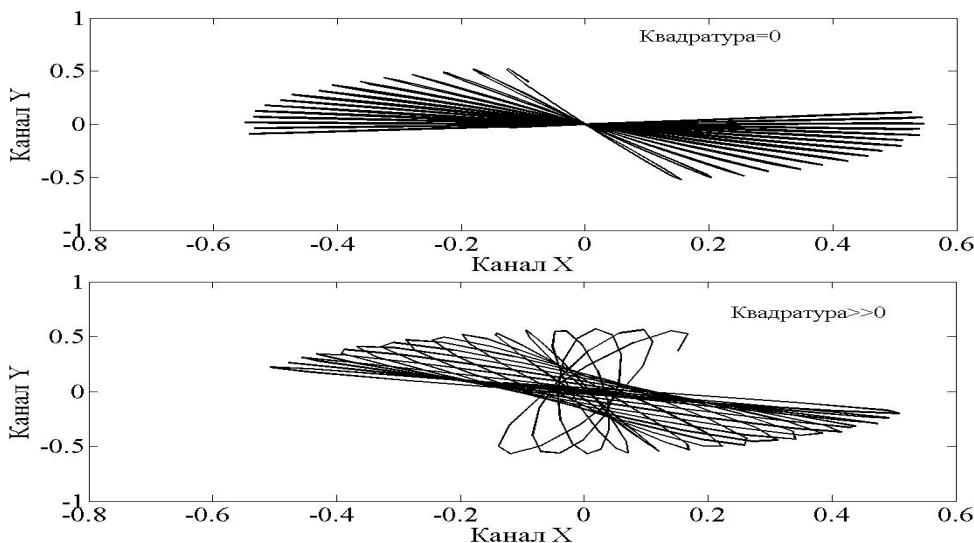


Рис. 6. Траєкторія руху точки на резонаторі в ідеальному та реальному резонаторах

4. Результати моделювання. При ідеальному кільцевому резонаторі, коли різночастотність дорівнює нулю, і, отже, квадратура $q = Q = 0$, траєкторія руху матеріальної точки на ободі резонатора в

процесі коливань резонатора є прямою лінією, що збігається з радіусом кільця. Орієнтація цієї траєкторії, залишаючись прямою лінією, змінюється, обертаючись навколо центру кільця. У реальному резонаторі, при наявності різночастотності, сигнал квадратури $Q \neq 0$ і траєкторія точки на резонаторі є еліпсом. Ці траєкторії в координатах X та Y при $Q = 0$ і $Q \gg 0$ показані на рис. 6.

Коли КВГ працює в режимі датчика кутової швидкості (ДКШ), то кутова швидкість вимірюється і компенсується. При вимірюванні великих кутових швидкостей потрібно формувати значну напругу зворотного зв'язку. Наприклад, КВГ з металевим резонатором зазвичай має значення масштабного коефіцієнта на рівні 40 мВ/(град/с). При вимірюванні кутової швидкості $5 \cdot 10^3$ град/с, буде потрібна напруга зворотного зв'язку 200 В. У інтегруючому режимі КВГ, кутова швидкість не компенсується, тому можна працювати в малих напругах, вимірюючи великі кутові швидкості.

На рис. 7 представлено вимірювання кута інтегруючим КВГ, коли кутова швидкість дорівнює $5 \cdot 10^3$ град/с і має періодичний характер. Похибка вимірювання кута інтегруючим КВГ, обумовлена неідеальністю резонатора і має періодичний характер.

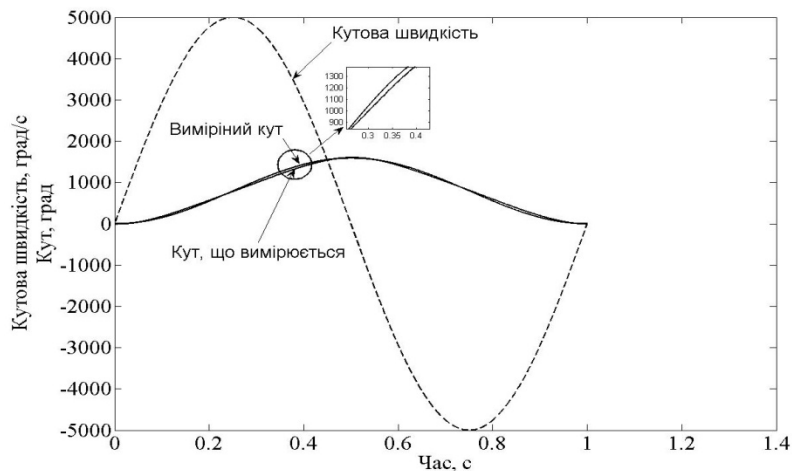


Рис. 7. Результат вимірювання кута при кутовій швидкості $5 \cdot 10^3$ град/с

Періодичний характер зміни похибки вимірювання кута інтегруючим КВГ добре видно на рис. 8, де представлені вимірювання кута при постійній кутовій швидкості обертання величиною 90 град/с для ідеального та реального (не ідеального) резонаторів.

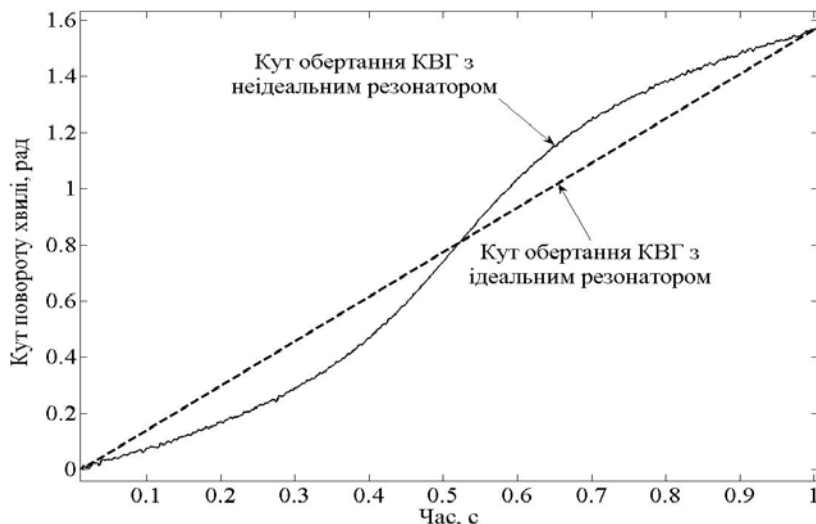


Рис. 8. Вимірювання кута повороту КВГ при постійній кутовій швидкості обертання 90 град/с з ідеальним та не ідеальним резонаторами

Висновки

КВГ відрізняється від інших гіроскопів (наприклад, КЛГ та ВОГ) тим, що всі режими КВГ можуть бути реалізовані в одному цифровому варіанті КВГ з автоматичним перемиканням режимів. Це надає КВГ незаперечні переваги перед іншими гіроскопічними технологіями у частині діапазону кутових швидкостей, динамічної похибки при вимірюванні великих кутових швидкостей, шумів при вимірюванні малих кутових швидкостей, а також надійності [5]. Наприклад, при вимірюванні малих кутових швидкостей доцільно працювати в режимі 2, а при збільшенні вимірюваної швидкості і частоти її зміни, щоб зменшити динамічну похибку, слід перейти на режим 4. У разі виникнення надтраєкторії руху високих віброударних прискорень

слід перейти на режим 3 [6]. Один з варіантів реалізації КВГ з перемикання режимів 2 → 4 і назад, представлений в [7]. Похибка вимірювання кута в режимі 4 носить періодичний характер.

Література

1. Lynch Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging, Proc. 2nd St. Petersburg Conf. on Gyroscopic Technology and Navigation, St. Petersburg, Russia, May 24-25, 1995.
2. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE std.1431TM. 2004.
3. Матвеев В.А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах / В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, М.А. Басараб. – М. : Физматлит, 2008.
4. Chikovani V. V., Tsiruk H. V. Digital Rate MEMS Vibratory Gyroscope Modeling, Tuning and Simulation Results. An International Journal of Computing Science and Applications (Computación y Sistemas), v. 21, No. 1, 2017, p. 147–159, doi: 10.13053/CyS-21-1-2497.
5. Чиковани В.В. Методика и расчет среднего времени наработки на отказ по результатам испытаний кориолисового вибрационного гироскопа / В.В. Чиковани, С.П. Маляров // Військово-технічний збірник. – Л. : Академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного. – 2011. – № 2 (5).
6. Valerii V. Chikovani, Olha A. Sushchenko, Hanna V. Tsiruk External Disturbances Rejection by Differential Single-Mass Vibratory Gyroscope. Acta Polytechnica Hungarica, 2017, vol. 14, 3, pp. 251–270.
7. Lynch D.D., Matthews A. Dual Mode Hemispherical Resonator Gyro Operating Characteristics. 3-rd St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, part 1, p. 37–44, 1996.

References

1. Lynch Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging, Proc. 2nd St. Petersburg Conf. on Gyroscopic Technology and Navigation, St. Petersburg, Russia, May 24-25, 1995.
2. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE std.1431TM. 2004.
3. Matveev B.A. Navyhatsyonnye systemy na volnovykh tverdotelnykh hyroskopakh / B.A. Matveev, B.S. Lunyn, M.A. Basarab. – M. : Fyzmatlyt, 2008.
4. Chikovani V. V., Tsiruk H. V. Digital Rate MEMS Vibratory Gyroscope Modeling, Tuning and Simulation Results. An International Journal of Computing Science and Applications (Computación y Sistemas), v. 21, No. 1, 2017, p. 147–159, doi: 10.13053/CyS-21-1-2497.
5. Chykovany V.V. Metodyka y raschet sredneho vremeny narabotky na otkaz po rezultatam uspytanyi koryolysovoho vybratsyonnoho hyroskopa / V.V. Chykovany, S.P. Maliarov // Viiskoho-tekhnichnyi zbirnyk. – L. : Akademiia sukhoputnykh viisk im. P. Sahaidachnoho. – 2011. – № 2 (5).
6. Valerii V. Chikovani, Olha A. Sushchenko, Hanna V. Tsiruk External Disturbances Rejection by Differential Single-Mass Vibratory Gyroscope. Acta Polytechnica Hungarica, 2017, vol. 14, 3, pp. 251–270.
7. Lynch D.D., Matthews A. Dual Mode Hemispherical Resonator Gyro Operating Characteristics. 3-rd St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, part 1, p. 37–44, 1996.

Рецензія/Peer review : 19.6.2019 р.

Надрукована/Printed : 18.7.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ю. В. Киричук