

УДК 681.586.2(045)

А. Ш. Алієв, студ.

СХЕМА КОМПЕНСАЦІЇ КВАДРАТУРНОЇ ЗАВАДИ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Запропоновано використання схеми компенсації квадратурної завади мікроелектромеханічної системи гіроскопів. Експериментально підтверджено, що застосування цієї схеми значно зменшує вплив квадратурної завади на точнісні характеристики мікроелектромеханічної системи гіроскопів.

Ключові слова: мікромеханічний гіроскоп, квадратурна завада, чутливий елемент, первинні, вторинні коливання.

Вступ. Розвиток сучасної мікроелектроніки зумовив появу нового класу інерційних датчиків – мікроелектромеханічних гіроскопів (ММГ). Мікроелектромеханічний гіроскоп являє собою мікроелектромеханічну систему, яка об'єднує в собі механічні та електронні компоненти. Мікроелектромеханічний гіроскоп є датчиком кутової швидкості.

Гіроскопи цього типу мають чимало переваг: малі габарити і маса, низьке енергоспоживання і вартість, висока надійність і здатність працювати в умовах вібрації і перевантаження. Сигнал, одержуваний з ММГ, може бути використаний для підвищення точності та надійності систем позиціонування і навігації, зокрема малогабаритних літальних апаратів.

Метрологічні характеристики ММГ багато в чому залежать від особливостей конструкції і якості виготовлення його чутливого елемента, який включає в себе рухливу масу (РМ), закріплену на основі за допомогою пружного підвісу, і систему електродів для вимірювання та керування положенням РМ. Керування РМ і виділення сигналу, пропорційного вимірюваній кутовій швидкості, здійснюються в ММГ за допомогою електроніки. Вона збуджує коливання РМ навколо первинної осі підвісу, забезпечує вимір зумовлених дією прискорення Коріоліса коливань РМ навколо вторинної (ортогональної до первинної) осі, а так само синхронне детектування сигналу, пропорційного вторинним коливань. Однак у ММГ на синхронний детектор надходить не тільки сигнал, зумовлений прискоренням Коріоліса, а й ортогональний до нього, названий квадратурною завадою [1]. У ММГ квадратурна завада може на 5 і більше порядків перевищувати величину його порога чутливості. Тому протягом останнього десятиліття однією з основних проблем, що перешкоджає підвищенню точнісних характеристик ММГ, у світовій практиці є придушення квадратурної завади. Актуальність завдання радикального зменшення квадратурної завади в ММГ не зменшується, а навпаки збільшується, оскільки вимоги до точності ММГ зростають.

Постановка завдання. Для широкого використання ММГ у системах та приладах високої точності передусім потрібно підвищувати точнісні характеристики ММГ. Основним джерелом похибок у ММГ є квадратурна завада. Тому досить актуальною проблемою розроблення науково обґрунтованих методів вимірювання та компенсації квадратурної завади.

Придушення квадратурної завади за допомогою синхронного детектора. На початковій стадії розроблення ММГ виділявся корисний сигнал і придушувалася квадратурна завада за допомогою одного елемента – синхронного детектора (СД) (рис. 1) [2].

Для підсилення сигналу перетворювачем ємність-напруга (ПЄН) і зменшення завад, що вносяться СД, між ними вводиться підсилювач, максимальний коефіцієнт передачі K якого можна знайти з виразу

$$K \leq \frac{U_{\text{сд}}}{U_{\text{пєн}}}, \quad (1)$$

де $U_{\text{сд}}$ – допустимий рівень вхідного сигналу СД; $U_{\text{псн}}$ – діапазоном зміни сигналу на виході ПСН.

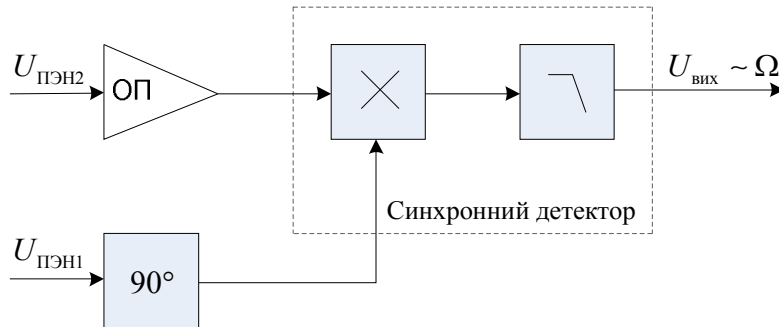


Рис. 1. Принцип виділення корисного сигналу

Похибки СД, якими можуть бути шум і зміщення нуля, що виникають через наявність фазового зсуву $\Delta\phi$ між вхідним і опорним напругами, перераховуються з коефіцієнтом K^{-1} до виходу ПСН. За великого рівня квадратурної завади значення K^{-1} теж виявляється великим. Тому, аналізуючи роздільну здатність ММГ, необхідно враховувати не тільки шуми вхідного каскаду ПСН, але й похибки СД.

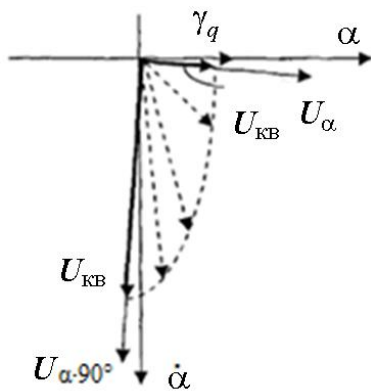


Рис. 2. Зображення квадратурної завади у вигляді вектора

Як впливає з результатів досліджень властивостей квадратурної завади, напруга на виході ПСН, пропорційна заваді залежно від різниці частот. Графічно можна подати у вигляді вектора $U_{\text{кв}}$, який повертається відносно вектора U_{α} , пропорційного первинним коливанням (рис. 2). При цьому мінімальна довжина вектора відповідає розбіжності резонансних частот підвісу більш ніж на 3 %, в цьому випадку різниця фаз становить менше одного градуса.

Максимальна величина $U_{\text{кв}}$ досягається за нульової розбіжності і різниці фаз між обома сигналами 90° . Крутизна фазової характеристики за добротності резонансного контуру 100 – 200 у разі суміщених частот на порядок перевищує її величину за частотної різниці більш ніж на 3 %. Тому якщо ММГ працює в режимі суміщених частот, нестабільність різниці резонансних частот може призводити до збільшення

похибок, що вносяться СД. У цьому режимі відносний розлад резонансних частот підвісу на 0,01 % призводить до зміни різниці фаз між обома сигналами більш ніж на 1° .

Вихідний сигнал ПСН каналу вторинних коливань $U_{\text{псн2}}$ за наявності в ММГ квадратурної завади можна записати так:

$$U_{\text{псн2}}(t) = A_{\text{кор}}(t) \cos(\omega_1 t) + A_{\text{кв}}(t) \sin(\omega_1 t). \quad (2)$$

З урахуванням фазового зсуву опорної напруги сигнал на виході демодулятора можна подати у вигляді

$$U_{\text{дет}}(t) = (A_{\text{кор}}(t) \cos(\omega_1 t) + A_{\text{кв}}(t) \sin(\omega_1 t)) \cos(\omega_1 t + \Delta\phi), \quad (3)$$

де $\Delta\phi$ – фазовий зсув між вхідним і опорним напругами. Після фільтрації сигналу (3) напруга на виході СД має вигляд:

$$U_{\text{сд}} = A_{\text{кор}}(t) \cos(\Delta\phi) + A_{\text{кв}}(t) \sin(\Delta\phi).$$

З виразу (3) випливає, що $\Delta\varphi$ впливає на такі характеристики ММГ, як масштабний коефіцієнт і зміщення нуля. Причому вплив $\Delta\varphi$ (за малих $\Delta\varphi$) на масштабний коефіцієнт значно менший, ніж на зміщення нуля. Враховуючи, що величини $A_{\text{кор}}$, $A_{\text{кв}}$ можуть відрізнятися на декілька порядків, можна зробити висновок про те, що в разі використання синхронного детектування для виділення корисного сигналу на фоні квадратурної завади, велика ймовірність дрейфу нуля ММГ унаслідок нестабільності внесеного фазового зсуву та великої величини квадратурної завади.

Для зменшення похибок, що вносяться СД, необхідно вирішити, принаймні, два завдання: 1) збільшити K підсилювача (рис. 1) за рахунок придушення квадратурного сигналу (у цьому випадку величина K буде визначатися діапазоном вимірюваної кутової швидкості, який може бути значно меншим від рівня квадратурної завади); 2) визначити і компенсувати фазовий зсув між вхідним і опорним сигналами СД.

Компенсація квадратурної завади в каналі оброблення вихідного сигналу. У цій роботі також розглядається завдання попереднього зниження рівня квадратурної завади на кілька порядків до надходження напруги з ПЄН (2) у блок виділення корисного сигналу. Тобто сигнал, пропорційний квадратурній заваді, має бути скомпенсований безпосередньо на виході ПЄН до СД. Мікроелектромеханічний гіроскоп, за допомогою якого компенсується квадратурна завада на виході ПЄН у каналі оброблення вихідного сигналу, показано на рис. 3.

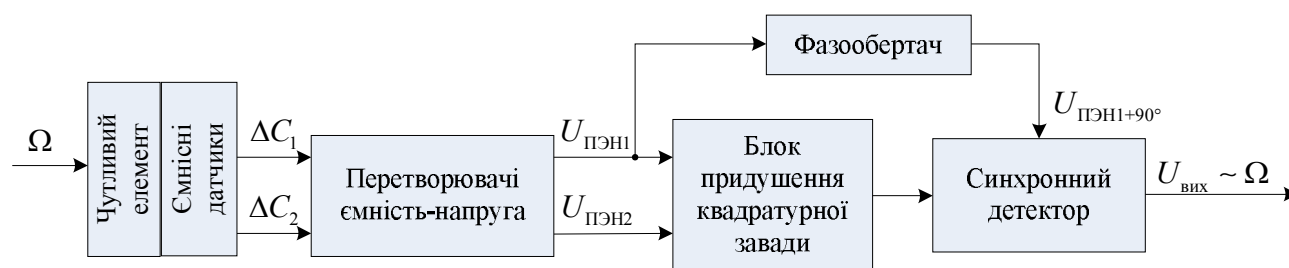


Рис. 3. Схема ММГ з блоком компенсації квадратурної завади в каналі оброблення вихідної напруги

Використовувати такий підхід можна лише в разі роботи гіроскопа з великою різницею власних резонансних частот підвісу. У цьому випадку сигнал на виході ПЄН, пропорційний квадратурній заваді, збігається за фазою із сигналом первинних коливань. Відповідно на нерухомій платформі напруга з виходу датчика кута по осі первинних коливань з певним підібраним коефіцієнтом можна підсумовувати з напругою (2), тим самим компенсуючи в цьому сигналі квадратурні складові. Спрощену блок-схему пристрою, що забезпечує автоматичний підбір коефіцієнта і компенсацію квадратурної завади в каналі оброблення вихідної напруги, показано на рис. 4.

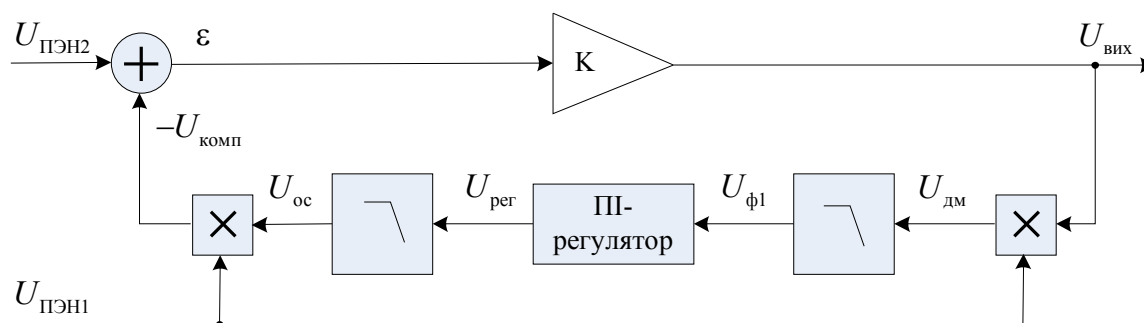


Рис. 4. Блок-схема пристрою компенсації квадратурної завади: ПІ – пропорційно-інтегруючий

На вхід пристрою (рис. 4) надходять два сигнали з виходу ПЄН: $U_{\text{ПЭН1}}$ і $U_{\text{ПЭН2}}$, пропорційні первинним і вторинним коливанням РМ відповідно. Підсилена в K разів вхідна напруга

$U_{\text{псн2}}$ надходить на перший помножувач, де демодулюється квадратурна складова. Напряга на виході першого помножувача має вигляд:

$$\begin{aligned} U_{\text{дм}}(t) &= K(A_{\text{кор}}(t) \cos(\omega_1 t) + A_{\text{кв}} \cos(\omega_1 t)) \sin(\omega_1 t) = \\ &= K(A_{\text{кор}}(t) \sin(2\omega_1 t) + A_{\text{кв}}(1 + \cos(2\omega_1 t))), \end{aligned} \quad (4)$$

де K – коефіцієнт перетворення, що враховує коефіцієнт підсилення прямого тракту і коефіцієнт передачі помножувача.

Сигнал (4) являє собою суму постійної напруги, пропорційної амплітуді квадратурної завади, і двох високочастотних гармонічних сигналів на подвоєній частоті первинних коливань. За допомогою ПІ-регулятора виділяється постійна складова, яка на другому помножувачі використовується як модулювальний сигнал, задаючи необхідну амплітуду опорної напруги $U_{\text{псн1}}$. У цьому випадку помножувач розглядається як пристрій з коефіцієнтом підсилення, керованим напругою, або як амплітудний модулятор. У результаті формується напруга тієї ж амплітуди й частоти, що і сигнал квадратурної завади:

$$U_{\text{комп}}(t) = A_{\text{кв}}(t) \sin(\omega_1 t). \quad (5)$$

Сигнал (5) віднімається від вихідного сигналу (2), тим самим компенсуючи квадратурну заваду. Таким чином, на вихід блока компенсації завади надходить напруга вигляду

$$U_{\text{вих}}(t) = A_{\text{кор}}(t) \sin(\omega_1 t).$$

Для зменшення впливу високочастотного шуму в контурі використовуються фільтри низьких частот першого порядку.

Для оцінювання стійкості системи, показаної на рис. 4, виконано такий аналіз.

Вираз для помилки ε має вигляд:

$$\varepsilon(t) = U_{\text{псн2}}(t) - A_{\text{зз}}(t) \sin(\omega_1 t).$$

Тоді вихідний сигнал контуру можна подати у вигляді

$$U_{\text{вих}}(t) = K(U_{\text{псн2}}(t) - A_{\text{зз}}(t) \sin(\omega_1 t)). \quad (6)$$

З урахуванням рівняння (6) напруга на виході першого помножувача

$$\begin{aligned} U_{\text{дм}}(t) &= K(U_{\text{псн2}}(t) - A_{\text{зз}}(t) \sin(\omega_1 t)) \sin(\omega_1 t) = \\ &= K(A_{\text{кв}}(t) \sin^2(\omega_1 t) + A_{\text{кор}}(t) \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) - U_{\text{зз}}(t) \sin^2(\omega_1 t)) = \\ &= \frac{1}{2} K(A_{\text{кв}}(t) - A_{\text{кв}} \cos(2\omega_1 t) + A_{\text{кор}}(t) \sin(2\omega_1 t) + A_{\text{кор}}(t) - U_{\text{зз}}(t) - U_{\text{зз}}(t) \cos(2\omega_1 t)). \end{aligned} \quad (7)$$

Після проходження напруги (7) через ФНЧ1 на регулятор надходить напруга вигляду

$$U_{\text{ф1}}(t) = \frac{1}{2} K(A_{\text{кв}}(t) - U_{\text{зз}}(t)).$$

Тоді сигнал на виході ПІ-регулятора в p -області можна подати у вигляді

$$U_{\text{зз}}(p) = W_{\text{рег}}(p) L\left(\frac{1}{2} K(A_{\text{кв}}(t) - U_{\text{зз}}(t))\right), \quad (8)$$

де L – функція прямого перетворення Лапласа; $W_{\text{рег}}$ – передатна функція регулятора.

З виразу (8) випливає, що зворотний зв'язок не впливає на корисний сигнал, ортогональний квадратурній заваді, який надходить на вихід пристрою, підсиленням в K разів.

На підставі виразу (8) можна зробити висновок про те, що судити про стійкість системи компенсації квадратурної завади, нехтуючи помножувачами, можна за логарифмічними частотними характеристиками розімкнутого контуру (рис. 5).

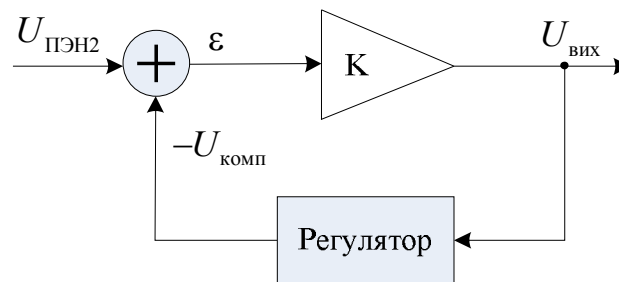


Рис. 5. Спрощена блок-схема контуру компенсації завади

Помножувачі, що використовуються у схемі, можна вважати інерційними ланками з постійними коефіцієнтами підсилення. Тоді вираз передатної функції розімкненої системи (рис. 5) за обвідної можна подати у вигляді

$$W_{з.с}(p) = \frac{KK_d K_m}{T_1 p (T_2 p + 1)^2},$$

де K , K_d , K_m – коефіцієнти підсилення операційного підсилювача, демодулятора і модулятора відповідно; T_1 – стала часу інтегрувальної ланки; T_2 – стала часу ФНЧ. Передатна функція замкненої системи описується виразом

$$W_{з.с}(p) = \frac{T_1 p (T_2 p + 1)^2}{\frac{K}{K_d K_m} T_1 p (T_2 p + 1)^2 + 1}.$$

Коефіцієнт K вибирається з умови (1). Проте максимальна величина $U_{псн}$ після компенсації квадратурної завади вже визначається сигналом, пропорційним кутовій швидкості Ω , а не величиною квадратурної завади. Значення T_1 визначає час перехідного процесу системи і вибирається з вимог до швидкодії контуру компенсації завади. Зміна квадратурної завади є дуже повільним процесом, тому будь-яка стала часу T_1 не буде позначатися на якості роботи контуру компенсації квадратурної завади. Величина T_2 визначає частоту зрізу логарифмічної частотної характеристики і смугу пропускання ФНЧ і вибирається залежно від несучої частоти сигналу. Моделювання пристрою компенсації квадратурної завади проводилося в середовищі Matlab.

Перехідні процеси (сигнали на виході регулятора), які відповідають різним рівням квадратурної завади показано на рис. 6. Процес формування компенсаційного сигналу за амплітуди квадратурної завади на вході пристрою 0,1 В показано на рис. 7.

Під час моделювання для наочності вхідний сигнал задавався у вигляді:

$$U_{псн2}(t) = A_{\Omega}(t) \cos(\Omega t) + A_{кв} \sin(\omega_1 t),$$

де A_{Ω} ; Ω – амплітуда і частота вимірюваної кутової швидкості. Амплітуда квадратурної складової перевищує амплітуду корисного сигналу в 10^3 .

Вихідні сигнали контурів придушення квадратурної завади і виділення корисного сигналу показано на рис. 8. З графіків видно, що на початковому інтервалі часу вихідні підсилювачі перебувають у режимі насичення, перешкоджаючи виділенню корисної складової. Після закінчення перехідного процесу компенсації квадратурної завади видно амплітудно-модульований сигнал, обвідна якого містить інформацію про вимірювану кутову швидкість платформи.

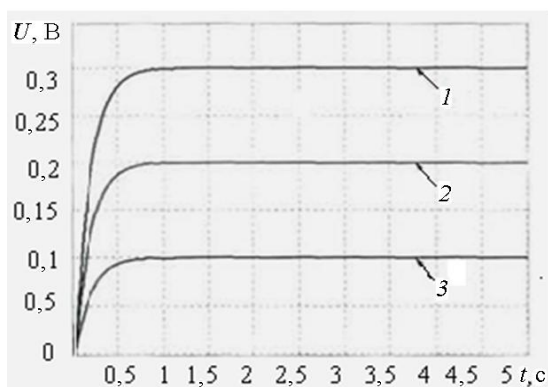


Рис. 6. Графіки перехідних процесів на інтеграторі

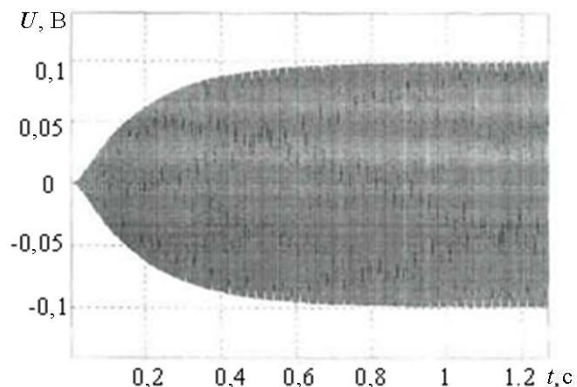
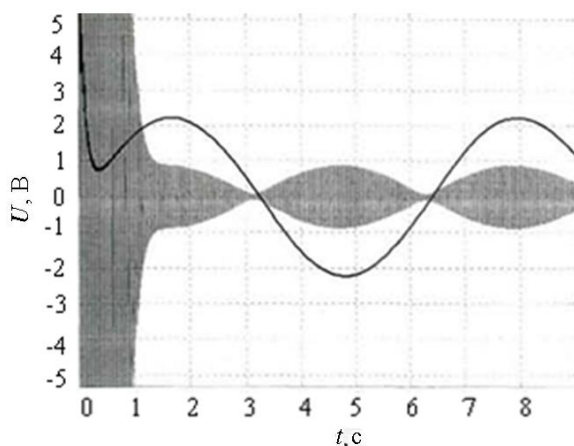


Рис. 7. Формування компенсаційного сигналу

Рис. 8. Вихідні сигнали контурів придушення
квадратурної завади і виділення корисного сигналу

Висновки. Запропонована схема придушення квадратурної завади дозволяє значно зменшити її вплив на точність знімання даних з мікромеханічного гіроскопа, що значно розширює його використання.

Список літератури

1. *Распопов В. Я.* Микромеханические приборы / В. Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
2. *Беляева Т. О.* Методы компенсации квадратурной помехи в микромеханическом гироскопе RR-типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Т. О. Беляева. – СПб.: – 2009. – 126 с.

А. Ш. Алиев

Схема компенсации квадратурных помех микромеханических гироскопов

Предложено использование схемы компенсации квадратурной помехи микроэлектромеханической системы гироскопов. Экспериментально подтверждено, что применение данной схемы значительно уменьшает влияние квадратурной помехи на точностные характеристики микроэлектромеханической системы гироскопов.

A. Sh. Aliyev

The compensating circuit of quadrature noise of microelectromechanical systems gyroscopes

Proposed use compensating circuit of quadrature noise of microelectromechanical systems gyroscopes. Experimentally confirmed that the application of this scheme significantly reduces the impact of the quadrature noise on accuracy characteristics of microelectromechanical systems gyroscopes.