

О. В. Збруцький, В. О. Апостолюк
Дослідження динаміки карданового мікромеханічного гіроскопа

Вступ

З розвитком мікроелектронних технологій стало можливим використання останніх для створення мініатюрних гіроскопів. Оскільки мікромеханічні давачі, які прогноуються, мають велику перспективу щодо застосування, представляються актуальними дослідження різних конструктивних схем мікромеханічних давачів, а також розробка рекомендацій щодо їхнього вдосконалення, включаючи оптимізацію параметрів.

Перспективність мікромеханічних давачів на цей час не викликає сумнівів. Серед факторів, завдяки яким вони мають переваги перед датчиками інших типів, можна виділити надмініатюрність, низьку собівартість при масовому виробництві, мале енергоспоживання. Усі ці фактори об'єктивно сприяють їх широкому застосуванню. Унікальні якості мікромеханічних давачів обумовлюють їхнє використання навіть у нетрадиційних для інерціальних приладів видах продукції, а доступність технології інтегральних мікросхем - можливість прискореного освоєння у виробництві та масового випуску.

Мікромеханічний вібраційний гіроскоп (рис.1), побудований із використанням карданової схеми, не має частин, що обертаються, а замість цього використовується вібрація елементів гіроскопа навколо торсіонів. Вперше така конструкція була запропонована спеціалістами фірми The Charles Stark Draper Laboratory [1-3].

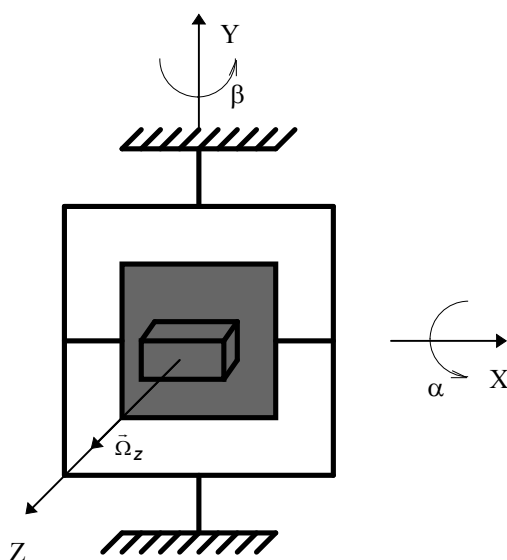


Рис.1. Мікромеханічний вібраційний гіроскоп.

Гіроскоп являє собою карданову конструкцію з інерційним елементом, змонтованим на внутрішній кардановій рамці. Внутрішня карданова рамка може розглядатися як чутливий елемент, а зовнішня - як двигун. Зовнішня і внутрішня рамки з'єднані за допомогою торсіонів. Торсіони мають малу пружність щодо кручення у порівнянні із пружністю на згин. Зовнішня рамка здійснює вимушені кутові коливання β із малою амплітудою і високою частотою навколо осі своїх торсіонів (вісь Y на рис.1). При цьому внутрішня рамка стає чутливою до кутової швидкості Ω_z , направленої по осі, яка перпендикулярна до площини гіроскопу. Вона здійснює кутові коливання α навколо осі своїх торсіонів з амплітудою і фазою, що залежать від зовнішньої кутової швидкості.

Збудження вимушених коливань може здійснюватися електростатично, а вимір вихідного сигналу - за допомогою ємнісного датчика. Електроди наносяться на поверхню зовнішньої і внутрішньої карданових рамок.

Рівняння руху чутливого елемента

Карданова схема мікромеханічного вібраційного гіроскопу має дві степені свободи. В якості узагальнених координат прийемо кут повороту зовнішньої карданової рамки відносно корпусу β і кут повороту внутрішньої рамки відносно зовнішньої α . З урахуванням малості узагальнених координат система лінеаризованих диференціальних рівнянь, що описують поведінку чутливого елемента мікромеханічного вібраційного гіроскопу на обертовій основі має вигляд

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\alpha} + f_1 \dot{\alpha} + c_1 \alpha - G \Omega_z \dot{\beta} - D_1 (\Omega_y^2 - \Omega_z^2) \alpha - \\ - (\dot{\Omega}_z I_1 - D_1 \Omega_x \Omega_y) \beta + D_1 \Omega_y \Omega_z + \dot{\Omega}_x I_1 = 0, \\ I_2 \ddot{\beta} + f_2 \dot{\beta} + c_2 \beta + G \Omega_z \dot{\alpha} - D_2 (\Omega_x^2 - \Omega_z^2) \beta + \\ + (D_1 \Omega_x \Omega_y - \dot{\Omega}_z D_1) \alpha - D_2 \Omega_x \Omega_z + \dot{\Omega}_y I_2 = M(t), \end{cases} \quad (1)$$

де $\vec{\Omega} = \{\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z\}$ - вектор переносної кутової швидкості, що вимірюється; I_1, I_2, G, D_1 і D_2 - коефіцієнти, що залежать від геометричних параметрів конструкції; $M(t)$ - момент зовнішніх сил, які викликають вимушені коливання зовнішньої рамки; c_1, c_2 - кутові пружності торсіонів; f_1, f_2 - коефіцієнти демпфування зовнішньої та внутрішньої рамок відповідно.

Отриману систему рівнянь (1) можна перетворити до вигляду

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} + 2h_1 \dot{\alpha} + k_1^2 \alpha - g_1 \Omega_z \dot{\beta} - d_1 (\Omega_y^2 - \Omega_z^2) \alpha - \\ - (\dot{\Omega}_z - d_1 \Omega_x \Omega_y) \beta + d_1 \Omega_y \Omega_x + \dot{\Omega}_x = 0, \\ \ddot{\beta} + 2h_2 \dot{\beta} + k_2^2 \beta + g_2 \Omega_z \dot{\alpha} - d_2 (\Omega_x^2 - \Omega_z^2) \beta + \\ + d_3 (\Omega_x \Omega_y - \dot{\Omega}_z) \alpha - d_2 \Omega_x \Omega_z + \dot{\Omega}_y = m(t), \end{cases} \quad (2)$$

де $h_i = f_i/2I_i$, $k_i^2 = c_i/I_i$, $d_i = D_i/I_i$, $g_i = G/I_i$, $d_3 = D_1/I_2$, $m(t) = M(t)/I_2$, ($i = 1,2$).

Отримані системи диференціальних рівнянь описують поведінку чутливого елементу карданового мікромеханічного гіроскопу при змінному як по величині, так і по напрямку довільно зорієнтованому векторі кутової швидкості $\vec{\Omega}$.

Якщо прийняти, що вектор кутової швидкості, що вимірюється, є постійним, але довільно орієнтованим по відношенню до площини приладу, то система спрощується і набуває вигляду

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} + 2h_1\dot{\alpha} + k_1^2\alpha - g_1\Omega_z\dot{\beta} - d_1(\Omega_y^2 - \Omega_z^2)\alpha + d_1\Omega_x\Omega_y\beta + d_1\Omega_y\Omega_z = 0, \\ \ddot{\beta} + 2h_2\dot{\beta} + k_2^2\beta + g_2\Omega_z\dot{\alpha} - d_2(\Omega_x^2 - \Omega_z^2)\beta + d_3\Omega_x\Omega_y\alpha - d_2\Omega_x\Omega_z = m(t). \end{cases}$$

Якщо вектор переносної кутової швидкості зорієнтований перпендикулярно до площини приладу (рис.1), тобто $\vec{\Omega} = \{0,0,\Omega\}$, то система диференціальних рівнянь руху чутливого елементу спрощується до виду

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} + 2h_1\dot{\alpha} + (k_1^2 + d_1\Omega^2)\alpha - g_1\Omega\dot{\beta} = 0, \\ \ddot{\beta} + 2h_2\dot{\beta} + (k_2^2 + d_2\Omega^2)\beta + g_2\Omega\dot{\alpha} = m(t). \end{cases} \quad (3)$$

Отримані рівняння для карданового мікромеханічного вібраційного гіроскопу є нелінійними щодо вимірюваної кутової швидкості Ω . Крім цього, деякі коефіцієнти рівнянь залежать від кутової швидкості і тому у загальному випадку є функціями часу. Знаходження рішень такої системи потребує використання деяких припущень щодо спрощення.

Рух чутливого елементу на нерухомій основі

Розглянемо поведінку чутливого елементу карданового мікромеханічного вібраційного гіроскопу на нерухомій основі. У цьому випадку переносна кутова швидкість $\Omega = 0$, і система диференціальних рівнянь руху (2) трансформується до вигляду

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} + 2h_1\dot{\alpha} + k_1^2\alpha = 0, \\ \ddot{\beta} + 2h_2\dot{\beta} + k_2^2\beta = m(t). \end{cases} \quad (4)$$

Система диференціальних рівнянь розпадається на два незалежних лінійних диференціальних рівняння другого порядку відносно узагальнених координат.

При гармонічному збудженні коливань зовнішньої рамки момент, утворюваний системою збудження, описується виразом:

$$m(t) = m_0 \sin(\omega t + \sigma).$$

Загальним рішенням сукупності рівнянь (4) при нульових початкових умовах будуть наступні залежності узагальнених координат від часу

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= 0, \\ \beta(t) &= B_0 e^{-h_2 t} \sin\left(t\sqrt{k_2^2 - h_2^2} + \beta_0\right) + \frac{m_0}{\sqrt{(k_2^2 - \omega^2)^2 + 4h_2^2\omega^2}} \sin(\omega t + \gamma), \end{aligned} \quad (5)$$

де постійні коефіцієнти B_0 і β_0 визначаються з початкових умов, а фаза вимушених коливань γ знаходиться із співвідношення

$$\operatorname{tg}(\sigma - \gamma) = 2h\omega / (k_2^2 - \omega^2).$$

Аналізуючи одержані рішення (5), бачимо, що зовнішня рамка чутливого елемента здійснює вимушені коливання з амплітудою, пропорційною моменту сил системи збудження (після редукації власних коливань) навколо осі Y , у той час як внутрішня рамка залишається нерухомою, і вихідний сигнал буде нульовим.

Рух чутливого елемента на обертовій основі

Вивчимо тепер поведінку чутливого елемента карданового мікромеханічного вібраційного гіроскопу на основі, яка обертається з постійною кутовою швидкістю. Не обмежуючи загальності задачі будемо вважати, що вектор переносної кутової швидкості орієнтований вздовж осі Z , тобто $\vec{\Omega} = \{0, 0, \Omega\}$. Рух чутливого елемента буде описуватися в цьому випадку системою диференціальних рівнянь (3).

На відміну від сукупності диференціальних рівнянь (4), тут рівняння утворюють систему рівнянь, пов'язаних між собою гіроскопічними членами, пропорційними до кутової швидкості.

При гармонічному збудженні кутових коливань зовнішньої рамки з частотою ω та нульовою фазою момент, діючий на неї, може бути заданий наступним чином:

$$m(t) = \operatorname{Re}\{m_0 e^{i\omega t}\}.$$

Колівання зовнішньої та внутрішньої рамок, відповідні до часткового рішення системи неоднорідних диференціальних рівнянь (3), будемо шукати у вигляді

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \operatorname{Re}\{\bar{A} e^{i\omega t}\}, \quad \bar{A} = A e^{i\varphi_1}, \\ \beta(t) &= \operatorname{Re}\{\bar{B} e^{i\omega t}\}, \quad \bar{B} = B e^{i\varphi_2}, \end{aligned} \quad (6)$$

де A і B - амплітуди кутових коливань внутрішньої та зовнішньої рамок відповідно, а φ_1 і φ_2 - їхні фази.

Після підстановки виразів (6) для кутів повороту зовнішньої та внутрішньої рамок у систему (3) і переходу від комплексної амплітуди до дійсної одержуємо наступні вирази для амплітуди

$$\begin{aligned} A &= g_1 m_2 \omega \Omega / \sqrt{\Delta^2}, \\ \Delta^2 &= \left[(k_1^2 + d_1 \Omega^2 - \omega^2)(k_2^2 + d_2 \Omega^2 - \omega^2) - (4h_1 h_2 + g_1 g_2 \Omega^2) \omega^2 \right]^2 + \\ &+ 4\omega^2 \left[h_1 (k_2^2 + d_2 \Omega^2 - \omega^2) + h_2 (k_1^2 + d_1 \Omega^2 - \omega^2) \right]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

і фази

$$\operatorname{tg}(\varphi_1) = - \frac{2\omega \left[h_1 (k_2^2 + d_2 \Omega^2 - \omega^2) + h_2 (k_1^2 + d_1 \Omega^2 - \omega^2) \right]}{(k_1^2 + d_1 \Omega^2 - \omega^2)(k_2^2 + d_2 \Omega^2 - \omega^2) - (4h_1 h_2 + g_1 g_2 \Omega^2) \omega^2}$$

кутових коливань внутрішньої рамки мікромеханічного вібраційного гіроскопу. Графік залежності амплітуди коливань внутрішньої рамки від частоти збудження при постійній кутовій швидкості представлений на рис.2.

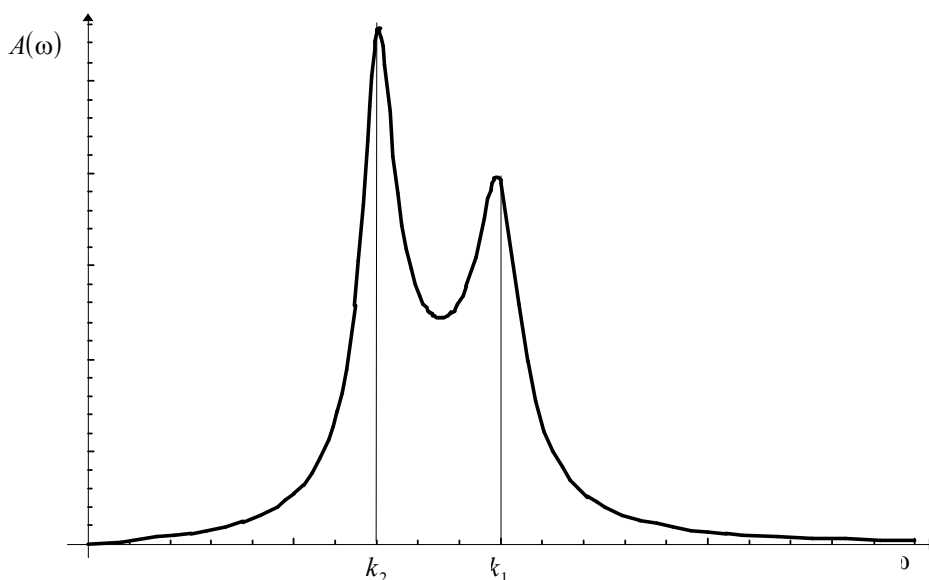


Рис.2. Залежність амплітуди коливань внутрішньої рамки від частоти збудження.

Як видно з отриманих виразів, чутливий елемент мікромеханічного вібраційного гіроскопу має дві власні частоти, що залежать від переносної кутової швидкості. Така залежність приводить до зміни власних частот системи і, отже, до зміщення максимумів амплітудно-частотної характеристики при зміні величини переносної кутової швидкості.

Власні частоти чутливого елемента гіроскопу

Знайдемо власні частоти кутових коливань зовнішньої та внутрішньої рамок. Характеристичне рівняння для системи (3) може бути представлене наступним чином:

$$\begin{aligned} \Delta(p) &= p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \\ a_3 &= 2(h_1 + h_2), \\ a_2 &= 4h_1 h_2 + k_1^2 + k_2^2 + (d_1 + d_2 + g_1 g_2) \Omega^2, \\ a_1 &= 2[h_1 k_2^2 + h_2 k_1^2 + (d_2 h_1 + d_1 h_2) \Omega^2], \\ a_0 &= k_1^2 k_2^2 + (d_2 k_1^2 + d_1 k_2^2) \Omega^2 + d_1 d_2 \Omega^4. \end{aligned} \tag{8}$$

Корені рівняння (8) можуть бути знайдені приблизно. Якщо прийняти в'язке тертя відсутнім, тобто $a_1 = a_3 = 0$, тоді вирази для квадратів власних частот будуть

$$\omega_{j0}^2 = \frac{1}{2} \left[k_1^2 + k_2^2 + (d_1 + d_2 + g_1 g_2) \Omega^2 \right] - \frac{(-1)^j}{2} \sqrt{\left[k_1^2 + k_2^2 + (d_1 + d_2 + g_1 g_2) \Omega^2 \right]^2 - 4(k_1^2 + d_1 \Omega^2)(k_2^2 + d_2 \Omega^2)}, \quad (9)$$

$j = 1, 2; \omega_{10} > \omega_{20}.$

Графік залежності j -тої частоти від переносної кутової швидкості показаний на рис.3.

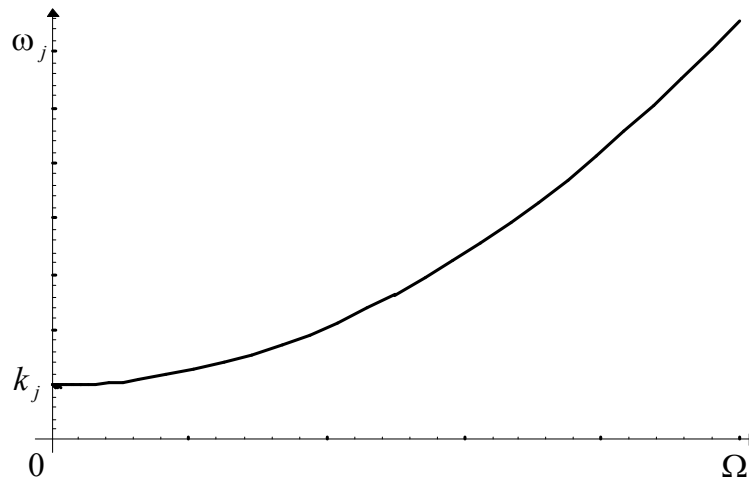


Рис.3. Залежність власних частот від переносної кутової швидкості.

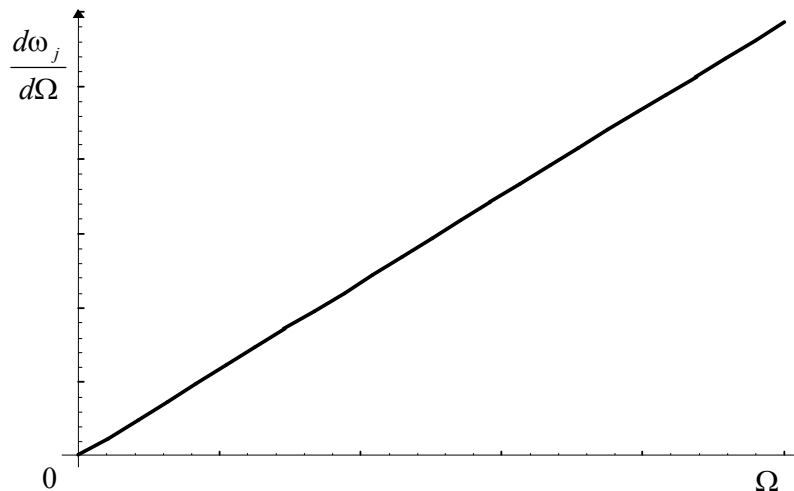


Рис.4. Перша похідна j -тої частоти як функція кутової швидкості

З урахуванням несуттєвості коефіцієнтів в'язкого тертя можемо знайти наступні значення для коренів характеристичного рівняння (8):

$$p_{1,2} = -h_{10} \pm i\omega_1, \quad p_{3,4} = -h_{20} \pm i\omega_2,$$

де $h_{10} = \frac{a_3 \omega_{10}^2 - a_1}{2(\omega_{10}^2 - \omega_{20}^2)}$; $h_{20} = \frac{a_1 - a_3 \omega_{20}^2}{2(\omega_{10}^2 - \omega_{20}^2)}$; $\omega_1 \approx \omega_{10}$; $\omega_2 \approx \omega_{20}$.

Якщо проаналізувати графіки залежності першої похідної для власних частот системи від переносної кутової швидкості (рис. 4), то можна бачити, що ця залежність близька до лінійної. З цього слідує, що залежність самої власної частоти, що визначається по формулі (9), від переносної кутової швидкості

близька до квадратичної. Вирази для власних частот чутливого елемента мікромеханічного вібраційного гіроскопу за відсутності демпфування запишемо у наступному вигляді:

$$\omega_j(\Omega) = k_j + q_j \frac{\Omega^2}{2}, \quad (10)$$

де $j=1,2$; q_j - постійний коефіцієнт, що залежить тільки від параметрів гіроскопа і має вигляд

$$q_j = \left(\frac{s_3}{2} + \frac{(-1)^j}{2} \frac{2s_2 - s_1 s_3}{\sqrt{s_1^2 - 4s_0}} \right) / \sqrt{2s_1 - (-1)^j 2\sqrt{s_1^2 - 4s_0}},$$

де

$$\begin{aligned} s_0 &= (k_1^2 + d_1)(k_2^2 + d_2), \\ s_1 &= k_1^2 + k_2^2 + d_1 + d_2 + g_1 g_2, \\ s_2 &= 2(d_1 k_2^2 + d_2 k_1^2 + 2d_1 d_2), \\ s_3 &= 2(d_1 + d_2 + g_1 g_2). \end{aligned}$$

Подання власних частот чутливого елемента мікромеханічного вібраційного гіроскопу у вигляді (10) дозволяє більш просто реалізувати систему підтримання резонансного режиму роботи приладу.

Вимірювання кутової швидкості

Функціонально мікромеханічний кардановий вібраційний гіроскоп може бути представлений за допомогою схеми на рис. 5, де позначено:

- Г - генератор прямокутних імпульсів із цифровим керуванням частотою;
- П1, П2 - вихідний та вхідний підсилювачі відповідно;
- СЗ - електростатична система збудження;
- ЧЕ - чутливий елемент;
- СР - ємнісна або магнітна система реєстрації коливань;
- АЦП - аналого-цифровий перетворювач;
- Ф - фільтр;
- АД - амплітудний детектор (демодулятор) ;
- ФД - фазовий детектор;
- П1 - вихідний перетворювач.

Частина схеми, яка відокремлена штриховою лінією, відповідає за електронну частину приладу, необхідну для формування сигналів збудження та отримання інформації про переносну кутову швидкість з вихідного сигналу. Інші блоки схеми відповідають чутливому елементу та обкладкам систем збудження та реєстрації механічних коливань. Мікроелектронна частина гіроскопа може бути виконана як в аналоговому, так і в цифровому вигляді.

Елементна база аналогової електроніки має деякі обмеження з точки зору мініатюризації.

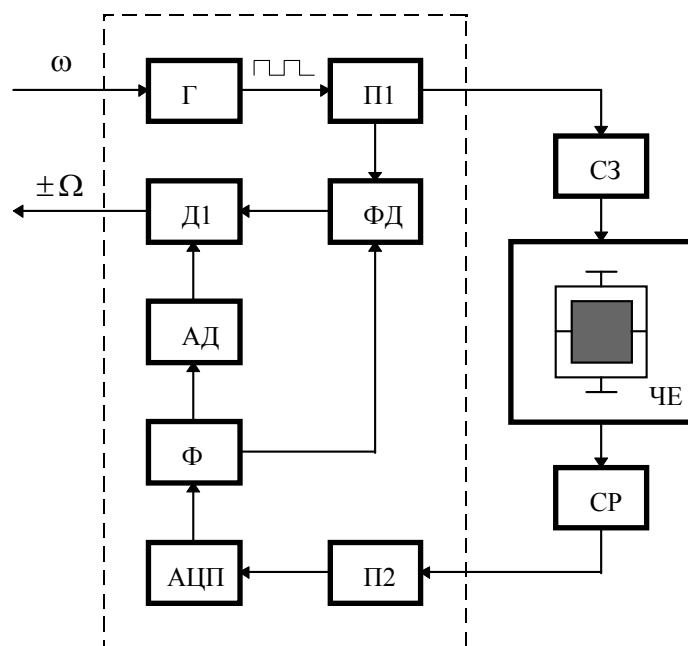


Рис.5. Функціональна схема мікромеханічного гіроскопа

При використанні прямої схеми вимірювання кутової швидкості на постійній частоті, відбувається збудження гармонійних коливань зовнішньої рамки чутливого елементу і, як слідує з аналізу системи диференціальних рівнянь (3), внутрішня рамка стає чутливою до переносної кутової швидкості. Частота збуджуваних коливань вибирається рівною до парціальної або власної частоти внутрішньої рамки. Внутрішня рамка здійснює гармонічні коливання на частоті збудження із амплітудою, що залежить від переносної кутової швидкості. Залежність амплітуди коливань внутрішньої рамки від кутової швидкості дається формулою (7). Вимірювання амплітуди коливань внутрішньої рамки чутливого елементу дає можливість визначити величину переносної кутової швидкості. Інформацію про знак кутової швидкості несе фаза коливань внутрішньої рамки. При зміні напрямку вектора кутової швидкості у фазі коливань з'явиться зміщення на π .

Розрахувавши чисельні значення всіх коефіцієнтів у рівняннях (3) для реальної конструкції чутливого елементу, одержимо залежність амплітуди коливань внутрішньої рамки від кутової швидкості, яка представлена графічно на рис.6.

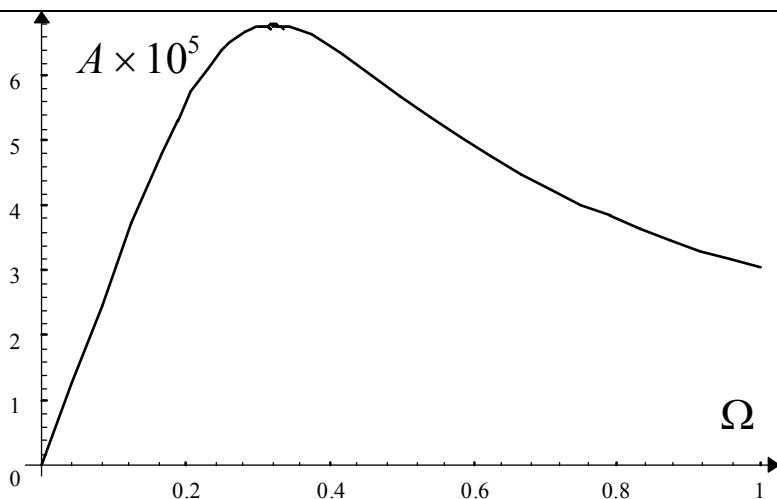


Рис.6. Вихідна характеристика при прямій схемі виміру

Як видно з цього графіка, верхня теоретична межа лінійності вимірювання переносної кутової швидкості для розглядуваної неоптимізованої конструкції, зумовлена динамікою чутливого елемента, складає приблизно 0.2 рад/с.

Істотним для прямої схеми вимірювання є те, що робоча частота в системі збудження і системі реєстрації інформації залишається незмінною протягом усього часу вимірювання кутової швидкості. З іншого боку, як слідує з формул (9), власні частоти чутливого елемента є функціями кутової швидкості. Це призводить до зміщення власних частот у залежності від кутової швидкості (рис.3) і, отже, до зміни амплітуди коливань зовнішньої рамки, що, в свою чергу, викликає небажані зміни коливань внутрішньої рамки. Запобігти цьому небажаному ефекту можна з використанням схеми із зворотним зв'язком по переносній кутовій швидкості.

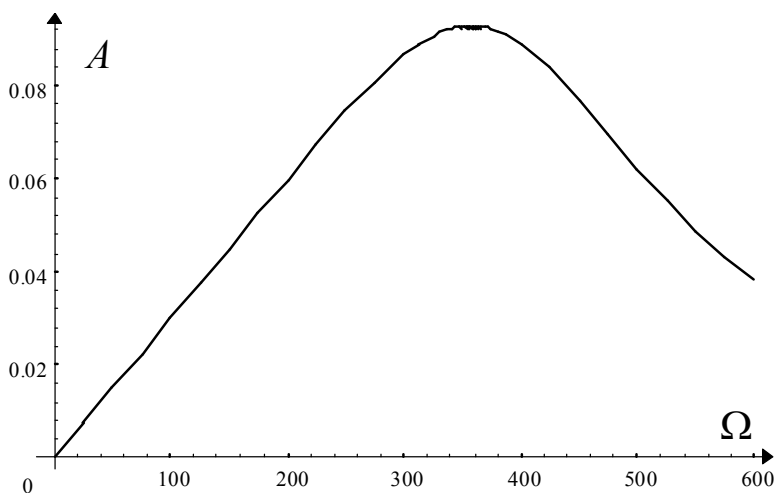


Рис.7. Вихідна характеристика при вимірі із зворотним зв'язком

При використанні прямої схеми вимірювання із змінною частотою збудження, отримана величина кутової швидкості використовується для зміни робочої частоти системи збудження і системи зйому інформації у відповідності до отриманої формули (13). В цьому випадку залежність амплітуди коливань

внутрішньої рамки чутливого елемента від переносної кутової швидкості буде визначатися співвідношеннями

$$A = g_1 m_2 \omega_1 \Omega / \sqrt{\Delta^2},$$

$$\omega_1 = k_1 + q_1 \frac{\Omega}{2},$$

$$\Delta^2 = \left[(k_1^2 + d_1 \Omega^2 - \omega_1^2)(k_2^2 + d_2 \Omega^2 - \omega_1^2) - (4h_1 h_2 + g_1 g_2 \Omega^2) \omega_1^2 \right]^2 + 4\omega_1^2 \left[h_1 (k_2^2 + d_2 \Omega^2 - \omega_1^2) + h_2 (k_1^2 + d_1 \Omega^2 - \omega_1^2) \right]^2.$$

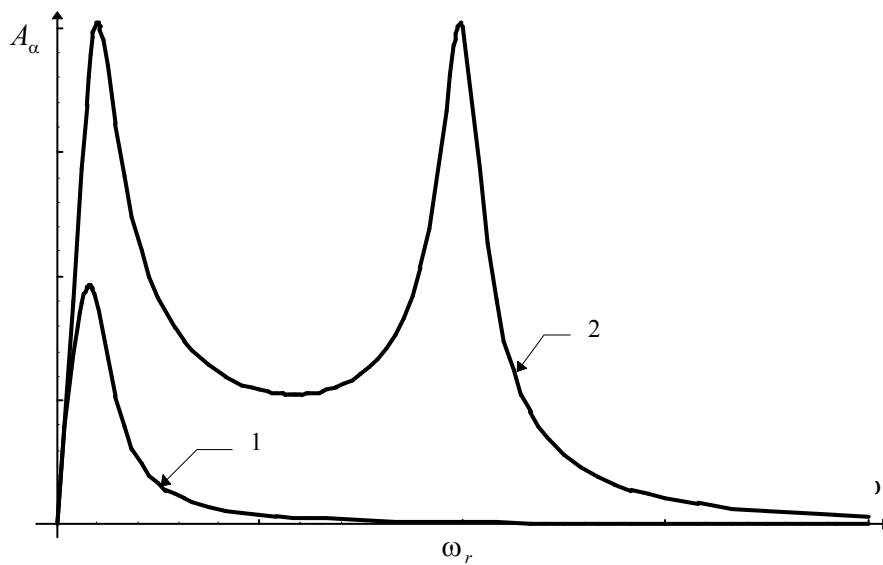


Рис.8. АЧХ карданового мікромеханічного гіроскопа:
1 - з компенсацією по швидкості;
2 - без компенсації.

Графік залежності амплітуди коливань внутрішньої рамки від переносної кутової швидкості при використанні замкнутої схеми виміру, побудований для реального чутливого елемента, приведений на рис.7.

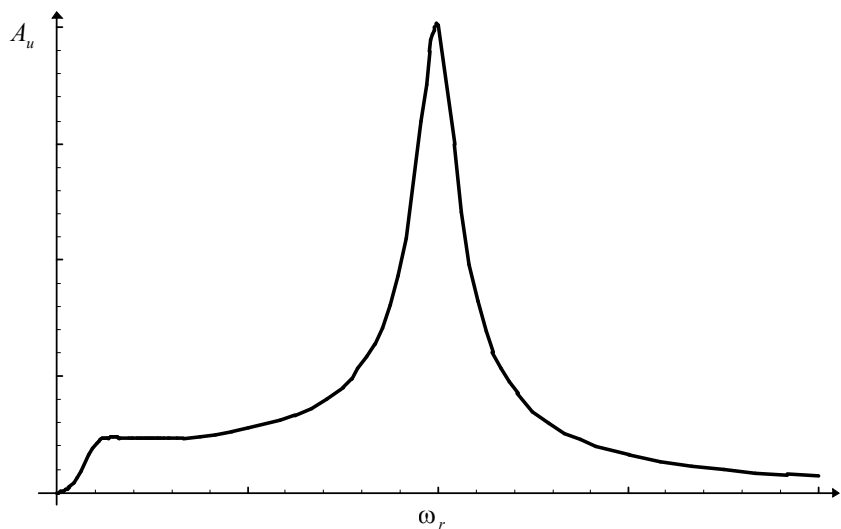


Рис.9. АЧХ напруги у ланцюгу швидкісної компенсації

З аналізу графіка на рис.7 слідує, що при використанні схеми виміру із змінною частотою верхня теоретична межа лінійності вимірювання кутової швидкості складає приблизно 300 рад/с. Таким чином, використання корекції по частоті у порівнянні із прямою схемою, дає збільшення діапазону лінійного вимірювання приблизно у 1500 разів.

Окрім прямої схеми вимірювання може використовуватися компенсаційна схема. Компенсація полягає в створенні додаткових сил, які діють на внутрішню рамку і компенсують її коливання. У цьому разі вихідна інформація про переносну кутову швидкість буде знаходитися у сигналах ланцюга компенсаційного зворотного зв'язку.

На відміну від класичної компенсації кутових переміщень, у випадку вібраційного гіроскопа ми маємо справу із компенсацією кутових коливань. Неповна, але достатня компенсація може бути досягнута за допомогою введення від'ємного зворотного зв'язку як по положенню внутрішньої рамки, так і по швидкості її кутових коливань. Введення позиційної компенсації відповідає зміні власної частоти внутрішньої рамки, що викликає зменшення амплітуди коливань внаслідок зміщення частоти резонансу. Система рівнянь, яка описує поведінку чутливого елемента у цьому випадку, має вигляд

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} + 2h_1\dot{\alpha} + (k_1^2 + d_1\Omega^2)\alpha - g_1\Omega\dot{\beta} = -k_r^2\alpha, \\ \ddot{\beta} + 2h_2\dot{\beta} + (k_2^2 + d_2\Omega^2)\beta + g_2\Omega\dot{\alpha} = m(t). \end{cases}$$

Вадою цього методу компенсації є як раз зміна власної частоти чутливого елемента, що буде заважати проводити ефективну фільтрацію вихідного сигналу, а також впровадженню алгоритмічній зміні робочої частоти збудження та реєстрації.

Іншим методом компенсації є створення зворотного зв'язку по швидкості. У цьому випадку ми маємо зменшення амплітуди коливань внутрішньої рамки внаслідок збільшення демпфування:

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} + 2h_1\dot{\alpha} + (k_1^2 + d_1\Omega^2)\alpha - g_1\Omega\dot{\beta} = -2h_r\dot{\alpha}, \\ \ddot{\beta} + 2h_2\dot{\beta} + (k_2^2 + d_2\Omega^2)\beta + g_2\Omega\dot{\alpha} = m(t). \end{cases}$$

Амплітуда коливань внутрішньої рамки в разі компенсації по швидкості при рівних парціальних частотах та малій кутовій швидкості буде (рис.8)

$$A_\alpha \approx \frac{g_1 m_0}{4h_r h_2 k_1} \Omega.$$

У цей час амплітуда коливань напруги у ланцюгу компенсації при тих самих умовах визначається виразом

$$A_u \approx \frac{g_1 m_0}{4h_1 h_2} \Omega,$$

та приведена на рис.9.

З аналізу графіків на рис. 8 та 9 бачимо, що на робочій частоті ω_r амплітуда кутових коливань внутрішньої рамки значно зменшилася, а амплітуда напруги у ланцюгу компенсації має свій максимум.

Використання компенсаційної схеми карданового мікромеханічного вібраційного гіроскопа дозволить зменшити дію шкідливого впливу коливань внутрішньої рамки на коливання зовнішньої, збільшити діапазон вимірюваних кутових швидкостей, зменшити вплив нелінійних ділянок пружності торсіонів та значно збільшити швидкодію чутливого елемента.

Висновки

Наведені вище результати дослідження динаміки чутливого елемента карданового мікромеханічного вібраційного гіроскопу дозволяють теоретично обґрунтувати вибір схеми виміру кутової швидкості, розрахувати основні параметри контуру зворотного зв'язку для схеми виміру із змінною робочою частотою, значно спростити конструкцію системи слідкування за власною частотою, проводити докладний аналіз динаміки проєктованих вібраційних гіроскопів з використанням карданової конструкції чутливого елемента.

Список літератури

1. Voxenhorn B. Planar inertial sensor. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc., Cambridge, Mass., U.S.Patent N 4598585. Заявл. 19.03.84., опубл. 8.07.86.
2. Вібраційний мікромеханічний гіроскоп / AIAA Guid., Navig. and Control Conference. Minneapolis, Minn., Aug. 15-17, 1988, Pt.2. Washington, 1988, p-p.1033-1040 /.
3. Voxenhorn B. Planares Tragheits sensor. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc., Cambridge, Mass., Патент N DE 3509948, A1. ФРГ. Заявл. 19.03.85., опубл. 26.09.85.

Рекомендована Науково-аналітичним центром критичних технологій навігаційного приладобудування при НТУУ "КПІ".