

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

УДК 531.534

МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП ЯК ВИМІРЮВАЧ ЛІНІЙНИХ ПРискорень ТА КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ*Борейко А. В., Чередниченко К. В., Бондар П. М.**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна*

Проаналізована можливість одночасного одержання інформації про лінійне прискорення та кутову швидкість рухомого об'єкта за допомогою мікромеханічного гіроскопа з диференціальним виходом, використовуючи пристрої віднімання та додавання сигналів. Описується структура та основні характеристики мультисенсорного мікромеханічного датчика. Проведено аналіз динамічних похибок вимірювання прискорення. Показано, що похибка вимірювання лінійного прискорення містить дві складові: перша – динамічна та друга, обумовлена обертанням основи, а також лінійним прискоренням, що діє в напрямку первинних коливань. Проведений аналіз діапазонів вимірювання прискорення та кутової швидкості підтверджує можливість використання таких датчиків на маневрених об'єктах. Показано, що відношення коефіцієнтів передачі по кутовій швидкості і прискоренню істотно залежить від амплітуди і частоти первинних коливань.

***Ключові слова:** мікромеханічний гіроскоп, мультисенсорний мікромеханічний датчик, чутливий елемент, динамічні похибки, кутова швидкість, лінійне прискорення.*

Постановка проблеми

В багатьох рухомих об'єктах основними кінематичними параметрами, які вимірюються, є кутові швидкості їх руху та лінійні прискорення.

На сьогодні набувають популярності мультисенсорні мікромеханічні датчики (ММД), здатні вимірювати одночасно кутову швидкість і лінійне прискорення руху. Використання кремнієвих мікромеханічних гіроскопів (ММГ) у мультисенсорному режимі дає можливість побудови широкої гама приладів для систем навігації й керування різними об'єктами.

Аналіз наукових досліджень і публікацій

Відомий принцип безпосереднього вимірювання лінійним акселерометром коріолісового прискорення, що виникає при наявності переносної кутової швидкості основи та штучно створеної вібрації корпусу приладу в площині, перпендикулярній осі його чутливості. Оскільки на чутливий елемент такого акселерометра вздовж осі його чутливості одночасно діє як коріолісове, так і лінійне прискорення, з'являється можливість вимірювати одночасно два параметри: кутову швидкість і лінійне прискорення. Основною проблемою в розробці мультисенсорних датчиків такого типу є створення вібропідвісу акселерометрів, що одночасно забезпечує задані параметри вібрації по стабільності й зменшення амплітуди вібрації по осі чутливості акселерометрів.

Методи побудови таких датчиків наведені в [1, 2].

В той же час конструкція мікромеханічних гіроскопів планарного типу вже передбачає наявність штучно створюваних первинних коливань чутливого елемента.

Мета роботи проаналізувати можливість використання мікромеханічних гіроскопів для одночасного вимірювання кутових швидкостей і лінійних прискорень, методи виділення окремих складових та похибок вимірювання прискорень.

Конструкція ММД

Однією з перспективних схем побудови мультисенсорних датчиків є схема на основі ММГ з диференціальним виходом, який реалізовано на основі серійного датчика ADXRS150 фірми Analog Device [3], шляхом деякого ускладнення внутрішньої структури датчика [4], що дозволяє отримувати інформацію як про кутову швидкість так і про лінійне прискорення об'єкта.

На рис. 1 зображено мультисенсорний мікромеханічний датчик, що містить два однакових чутливих елемента ЧЕ1 та ЧЕ2. Кожен чутливий елемент складається з інерційної маси 1, рамки 2, основи 3, системи збудження 4, емнісного датчика 5, пристрою додавання вторинних коливань 6, пристрою віднімання вторинних коливань 7. Також на рисунку позначено: \vec{u} - вектор кутової швидкості, \vec{W} - вектор лінійного прискорення, x, y, z - система координат зв'язана з об'єктом, q - сигнал збудження первинних коливань, W - вихідний сигнал лінійного прискорення, u - вихідний сигнал кутової швидкості [3].

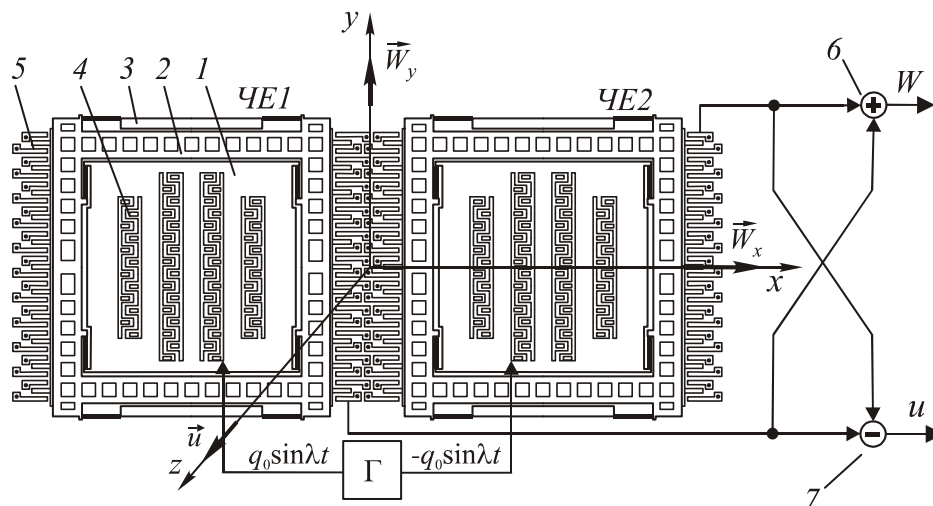


Рис. 1. Мультисенсорний мікромеханічний датчик

Таким чином, основними елементами досліджуваної схеми є два механічно незалежних чутливих елемента (ЧЕ1 та ЧЕ2), системи збудження 4, яких живляться від одного генератора (Г) так, що вимушені коливання їх чутливих елементів здійснюються в противофазі з однаковою амплітудою і частотою λ .

Теоретичні дослідження

Такий вимірювач описується системою рівнянь, яка має вигляд:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2h_{11}\dot{x}_1 + (k_1^2 - u^2)x_1 - 2u\dot{y}_1 &= q_{10} \sin \lambda t - W_X; \\ \ddot{y}_1 + 2h_{21}\dot{y}_1 + (k_2^2 - u^2)y_1 + 2d\dot{x}_1 &= -W_Z; \\ \ddot{x}_2 + 2h_{12}\dot{x}_2 + (k_1^2 - u^2)x_2 - 2u\dot{y}_2 &= -q_{20} \sin \lambda t - W_X; \\ \ddot{y}_2 + 2h_{22}\dot{y}_2 + (k_2^2 - u^2)y_2 + 2d\dot{x}_2 &= -W_Z; \end{aligned} \quad (1)$$

де h_{11} і h_{12} – відповідні коефіцієнти демпфування руху ЧЕ1 в напрямку координат x_1 і y_1 , h_{21} і h_{22} – відповідні коефіцієнти демпфування руху ЧЕ2 в напрямку координат x і y , k_{11} – парціальна частота інерційної маси ЧЕ1, k_{12} – парціальна частота рамки з інерційною масою ЧЕ1, k_{21} – парціальна частота інерційної маси ЧЕ2, k_{22} – парціальна частота рамки з інерційною масою ЧЕ2, $\vec{u} = \{0,0,u\}$ – кутова швидкість, d – безрозмірні коефіцієнти інерційної асиметрії, W_x, W_z – складові лінійного прискорення, $q(p)$ – узагальнене прискорення.

Система рівнянь руху чутливих елементів являє собою дві групи незалежних рівнянь. Оскільки нас цікавлять тільки вторинні коливання, знайдемо розв'язок по координатах y_1 та y_2 з другого та четвертого рівнянь.

$$y_1(p) = \frac{[p^2 + 2h_{11}p + (k_{11}^2 - u^2)]W_Y(p) - 2dup[q_{10}(p) - W_X(p)]}{[p^2 + 2h_{11}p + (k_{11}^2 - u^2)][p^2 + 2h_{21}p + (k_{21}^2 - u^2)] + 4du^2 p^2}$$

$$y_2(p) = \frac{[p^2 + 2h_{12}p + (k_{12}^2 - u^2)]W_Y(p) + 2dup[q_{20}(p) - W_X(p)]}{[p^2 + 2h_{12}p + (k_{12}^2 - u^2)][p^2 + 2h_{22}p + (k_{22}^2 - u^2)] + 4du^2 p^2}.$$

У разі виконання умов $h_{11} = h_{12} = h_1$; $h_{21} = h_{22} = h_2$; $k_{11} = k_{12} = k_1$; $k_{21} = k_{22} = k_2$; $q_{10} = q_{20} = q_0$ різницевої сигнал двох чутливих елементів

$$y_1(p) - y_2(p) = \frac{4dupq_0(p)}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)] + 4du^2 p^2},$$

містить інформацію тільки про кутову швидкість.

Вплив неоднаковості параметрів чутливих елементів на похибки вимірювань можна зменшити при застосуванні систем фазового автопідстроювання амплітуди і частоти первинних коливань.

Сумарний сигнал двох чутливих елементів

$$y_1(p) + y_2(p) = \frac{2[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)]W_Y(p) + 4dupW_X(p)}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)] + 4du^2 p^2} \quad (2)$$

містить інформацію тільки про лінійне прискорення.

Розглянемо вираз (2) більш детально.

Зазвичай $k_i^2 \gg u^2$, тому вираз (2) можна спростити:

$$y_1(p) + y_2(p) \approx \frac{2W_Y(p)}{p^2 + 2h_2p + k_2^2} + \frac{4dupW_X(p)}{(p^2 + 2h_1p + k_1^2)(p^2 + 2h_2p + k_2^2)}. \quad (3)$$

На основі одержаного виразу можна зробити висновок, що похибка вимірювання складової W_Y лінійного прискорення містить дві складові. Перша складова похибки є динамічною, викликана динамічними властивостями підвісу, співпадає з похибками класичного лінійного акселерометра і детально описана в літературі.

Друга складова похибки обумовлена обертанням основи, а також складовою W_X лінійного прискорення, що діє в напрямку первинних коливань.

Розглянемо цю складову за умови гармонічної зміни сигналу лінійного прискорення $W_X = W_{X0} \sin \omega t$, що діє в напрямку первинних коливань та постійної кутової швидкості обертання основи $u = \text{const}$. Тоді можна наступним чином записати складову похибки вимірювань по координаті y :

$$y_w = \frac{4du\omega W_{X0} \cos(\omega t + \varphi)}{(k^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}, \quad (4)$$

де $\varphi = \frac{\pi}{2} - \text{arctg} \frac{2h\omega}{k^2 - \omega^2}$.

Аналогічною є похибка коли $u = u_0 \sin \omega t$ та $W_X(p) = \text{const}$.

Найбільш небезпечним випадком є резонанс, тобто коли частота вібрації співпадає з парціальною частотою $k^2 = \omega^2$, що призводить до різкого зростання похибки завдяки зменшенню амплітуди первинних коливань. Максимальне значення цієї складової похибки вимірювань дорівнює

$$y_w = \frac{u}{h^2\omega} W_{X0}.$$

Порівняємо діапазони вимірювань кутової швидкості і лінійного прискорення.

Діапазон вимірювань ММГ визначається лінійною залежністю амплітуди вторинних коливань від вимірюваної кутової швидкості, в якому статичний коефіцієнт передачі згідно з формулою (2) за умови $u = 0$:

$$K_u(0) = \frac{dq_{10}}{h_1 \sqrt{(k_2^2 - \lambda^2)^2 + 4h_2^2\lambda^2}}. \quad (5)$$

В резонансному режимі збудження первинних коливань $k_1 = \lambda$. При цьому зазвичай друга парціальна частота більша за першу парціальну частоту ($k_2 > k_1$).

Позначимо $h_1 = \xi_1\lambda$; $h_2 = \xi_2\lambda$; $k_2 = (1 + \delta_{k_2})\lambda$.

Врахуємо також, що частинний розв'язок першого рівняння сукупності (1) за умови $\lambda \gg u$:

$$x(t) = \frac{q_{10}}{2\xi_1\lambda^2} \cos \lambda t.$$

З урахуванням величини q_{10} для заданої амплітуди первинних коливань перетворимо вираз (5):

$$K_u(0) = \frac{dq_{10}}{\xi_1\lambda\sqrt{(2\delta_{k2}\lambda^2)^2 + 4\xi_2^2\lambda^4}} = \frac{dx_m}{\lambda\sqrt{\delta_{k2}^2 + \xi_2^2}}.$$

Коефіцієнт передачі по прискоренню

$$K_w = \frac{1}{\lambda^2}.$$

Відношення коефіцієнтів передачі дорівнює

$$K_u(0)/K_w = \frac{d\lambda x_m}{\sqrt{\delta_{k2}^2 + \xi_2^2}}.$$

Якщо $x_m = 10^{-6}$ м; $\lambda = 14000$ Гц ($8,79 \cdot 10^4$ 1/с); $\delta_{k2} = 5 \cdot 10^{-3}$; $\xi_2 = 10^{-3}$ відношення $K_u(0)/K_w = 8,6$, тобто при діапазоні вимірювань кутової швидкості $u = 150^\circ/\text{с} \approx 2,6$ рад/с амплітуда вторинних коливань буде дорівнювати зміщенню ЧЕ під дією прискорення $W = 2,28g$

На рис. 2 наведений вихідний сигнал одного з вимірювачів у випадку руху основи з кутовою швидкістю $u = u_0 \sin bt$ і лінійним прискоренням $W_y = W_{y0} \sin(10t)$.

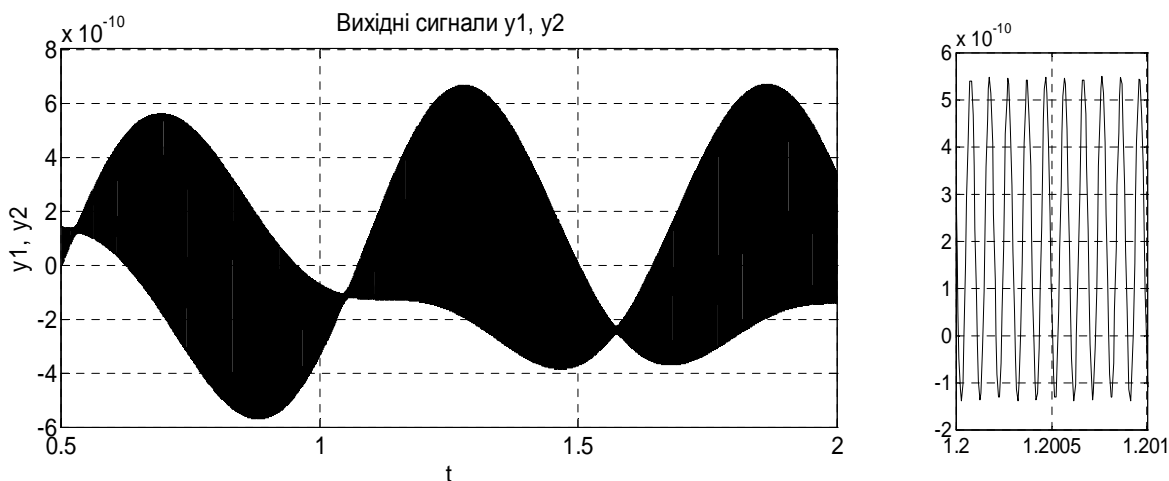


Рис. 2. Графік вторинних коливань ММГ з додатковою рамкою

Диференціальний вихід дозволяє виділити сигнали про кутову швидкість і про переносне лінійне прискорення.

На рис. 3, а наведений різницевий, а на рис. 3, б сумарний сигнали у випадку використання запропонованої схеми.

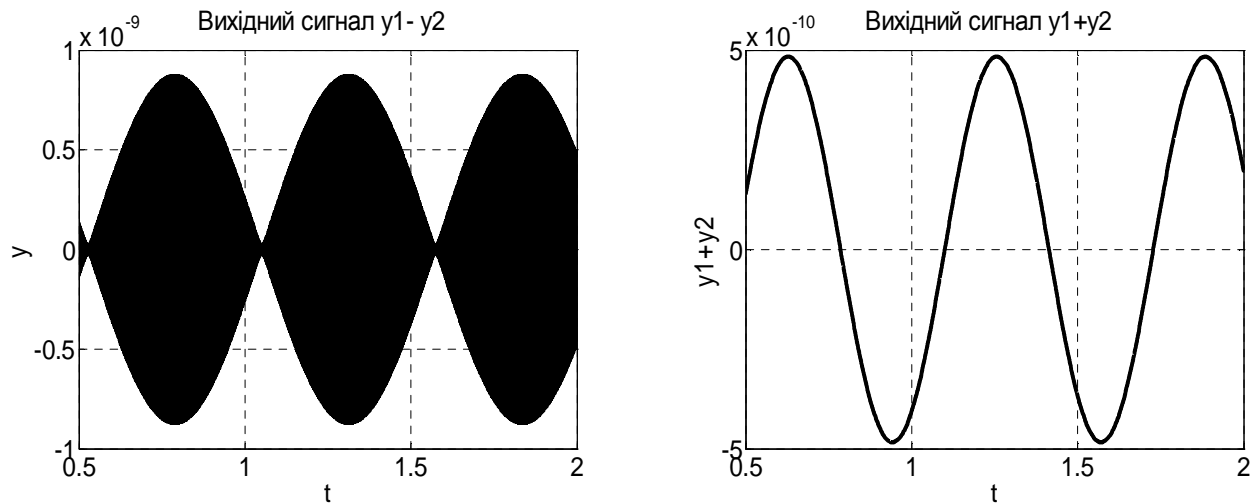


Рис. 3. Вихідні сигнали ММГ з диференціальним виходом

Висновки

Отримані результати показують принципову можливість застосування мікромеханічних гіроскопів планарного типу, побудованих за диференціальною схемою для одночасного виміру лінійного прискорення й кутової швидкості рухомого об'єкта.

Переносна кутова швидкість вимірюється шляхом вирахування вихідних сигналів, а переносне лінійне прискорення – шляхом складання цих сигналів. Показано, що похибка вимірювання лінійного прискорення містить дві складові: перша – динамічна та друга, обумовлена обертанням основи, а також лінійним прискоренням, що діє в напрямку первинних коливань. В подальшому планується дослідити вплив неоднаковості параметрів вимірювачів на точність виміру лінійних прискорень.

Література

1. Черняк Н. Г. Построение инерциального датчика для измерения линейных ускорений и угловых скоростей летательного аппарата / Н. Г. Черняк, Н. А. Мухоед // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 6. – С. 39.
2. Будкин В. Л. Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации / В. Л. Будкин, В.А. Паршин, С.В. Прозоров, А.К. Саломатин и др. // Режим доступа: - <http://www.microsystems.ru/files/publ/6.htm>
3. ADXRS150 $\pm 150^\circ/\text{s}$ Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning. Режим доступа: - http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/adxrs150.pdf
4. Пат. 61843 України, МПК G01C 23/00. Мікромеханічний гіроскоп / П. М. Бондар, К. В. Лошкарьова, Т. С. Житнік. Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – заявка № u201102536, опубліковано 25.07.2011, бюл. №14/2011.

Надійшла до редакції
03 березня 2015 року

© Борейко А. В., Чередниченко К. В., Бондар П. М., 2015