

УДК 531.534

**ВИКОРИСТАННЯ ПРУЖНИХ МЕХАНИЧНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВІБРОСТІЙКОСТІ МІКРОМЕХАНИЧНИХ ГІРОСКОПІВ***Борейко А. В., Чередниченко К. В., **Бондар П. М.****Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*Розглянуто можливість підвищення стійкості до механічних впливів мікромеханічних гіроскопів LL-типу, побудованих за диференціальною схемою, завдяки застосуванню загальних від'ємних зворотних зв'язків по сумі вихідних сигналів. Показано, що така схема еквівалентна схемі з пружним механічним зв'язком, створюваним додатковим важільним механізмом, кінематично з'єднуючим рамки двох чутливих елементів. Розроблена і проаналізована математична модель мікромеханічного гіроскопа LL-типу, яка враховує пружний механічний зв'язок в умовах вібраційних впливів і дії сталого прискорення. Доведено, що в досліджуваній схемі для зниження чутливості до вібрацій реалізований метод рознесення частот синфазних і протифазних коливань інерційних мас в пружному підвісі. Проведені аналітичні дослідження та моделювання складеної моделі в пакеті Simulink.*

**Ключові слова:** мікромеханічний гіроскоп, чутливий елемент, вібростійкість, кутова швидкість, лінійне прискорення.

**Постановка проблеми**

У даний час підвищенню вібраційної і ударної міцності та стійкості мікромеханічних гіроскопів (ММГ) приділяється суттєва увага. Показники стійкості сучасних ММГ до лінійних прискорень і поступальної вібрації вважаються одними з ключових показників. Тому основною проблемою є забезпечення працездатності ММГ при високих значеннях ударів і вібрації.

**Аналіз наукових досліджень і публікацій**

Сучасні вимоги до характеристик і показників ММГ постійно підвищуються у зв'язку з розширенням областей застосування, значною мірою відрізняються все більш високим рівнем зовнішніх факторів, зокрема більш широким діапазоном параметрів вібрації і ударів. Розширення існуючої сфери застосування ММГ потребує вирішення цілого комплексу специфічних завдань, основне з яких – підвищення стійкості датчиків до механічних зовнішніх факторів. Аналіз існуючих і розроблюваних шляхів, методів і технічних рішень по підвищенню стійкості ММГ до механічних зовнішніх факторів дозволяє розділити методи на структурно-конструктивні та алгоритмічні [1]. Гіроскопи LL-типу з поступальним рухом інерційної маси (ІМ) за принципом побудови найбільш чутливі до поступальної вібрації, особливо в діапазонах власних частот. Вплив лінійних прискорень призводить як до додаткових зміщень ІМ, які навантажують пружний підвіс, так і до появи небажаних резонансних явищ. Тому в таких конструкціях потрібно або знижувати рівень вібраційних впливів, або піднімати власні частоти вище верхньої межі встановленого діапазону частот вібрації, що підвищує стійкість до прискорень,

але знижує чутливість приладів до вимірюваної кутової швидкості.

Один з основних методів підвищення стійкості та зниження чутливості ММГ типу LL до лінійних прискорень, який зазвичай використовується при проектуванні нових приладів – це вибір оптимальної кількості ІМ в одному ММГ для компенсації впливу інерційних навантажень (сил інерції) на окремі чутливі елементи (ЧЕ). Принцип роботи таких приладів заснований на використанні двох і більше ІМ, які здійснюють протифазні коливання, що дозволяє використовувати диференціальний режим вимірювання та позбавлятися дії інерційних прискорень [2]. Такий принцип побудови застосований, наприклад, в приладах фірми Analog Devices LL типу ADXRS150 [3] з двома ЧЕ та ADXRS646 з чотирма ЧЕ з механічними зв'язками між ними [4].

**Мета роботи** проаналізувати вплив загальних зворотних зв'язків, що створюють додаткові пружні зв'язки між рухомими елементами багатомасових ММГ на їх вібростійкість.

**Теоретичні дослідження**

На рис. 1 зображено схему багатомасового ММГ з від'ємним зворотним зв'язком по сумі вихідних сигналів двох ЧЕ, побудовану на основі ММГ з диференціальним виходом [5] деяким ускладненням внутрішньої структури датчика.

Мікромеханічний датчик містить два однакових чутливих елемента. Кожен чутливий елемент складається з інерційної маси 5, рамки 4, основи 1, системи збудження 2, емнісного датчика 3, пристроїв додавання та віднімання вторинних коливань.

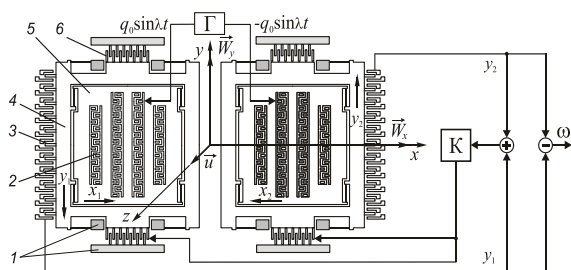


Рис. 1. Мікромеханічний датчик із системою зворотного зв'язку

Ланка зворотного зв'язку створена емісійними датчиками 3, підсилювачем (К) та силовими компенсаторами 6.

Також на рисунку позначено:  $\vec{u}$  – вектор вимірюваної кутової швидкості,  $\vec{W}$  – вектор лінійного прискорення,  $x, y, z$  – система координат, зв'язана з об'єктом,  $q$  – сигнал збудження первинних коливань,  $\omega$  – вихідний сигнал кутової швидкості.

Такий вимірювач описується системою рівнянь [6], яка з урахуванням сигналів зворотного зв'язку має вигляд:

$$\begin{cases} (p^2 + 2h_{11}p + k_{11}^2 - u^2)x_1 - 2dupy_1 = q_x(p); \\ 2upx_1 + (p^2 + 2h_{21}p + k_{21}^2 - u^2)y_1 = -\frac{k_3^2}{2}(y_1 + y_2) + W_Y(p); \\ (p^2 + 2h_{12}p + k_{12}^2 - u^2)x_2 - 2dupy_2 = -q_x(p); \\ 2upx_2 + (p^2 + 2h_{22}p + k_{22}^2 - u^2)y_2 = -\frac{k_3^2}{2}(y_1 + y_2) + W_Y(p), \end{cases} \quad (1)$$

де  $h_{11}$  і  $h_{21}$  – відповідні коефіцієнти демпфування руху ЧЕ1 в напрямку координат  $x_1$  і  $y_1$ ,  $h_{12}$  і  $h_{22}$  – відповідні коефіцієнти демпфування руху ЧЕ2 в напрямку координат  $x_2$  і  $y_2$ ,  $k_{11}$  – парціальна частота інерційної маси ЧЕ1,  $k_{21}$  – парціальна частота рамки з інерційною масою ЧЕ1,  $k_{12}$  – парціальна частота інерційної маси ЧЕ2,  $k_{22}$  – парціальна частота рамки з інерційною масою ЧЕ2,  $k_3$  – парціальна частота зв'язку інерційних мас ЧЕ1 та ЧЕ2,  $u$  – вимірювана кутова швидкість,  $W_Y$  – складова лінійного прискорення,  $q(p)$  – узагальнене прискорення.

Розв'язок системи рівнянь (1) по координаті  $y_1$  буде

$$y_1(p) = \frac{W_Y(p)[p^2 + 2h_2p + k_{21}^2] - 2upx_1(p)[p^2 + 2h_2p + (k_{21}^2 + k_3^2)]}{\left[ p^2 + 2h_2p + \left( k_{21}^2 + \frac{k_3^2}{2} \right) \right] \left[ p^2 + 2h_2p + k_{21}^2 + \frac{k_3^2}{2} \right] - \frac{k_3^4}{4}}, \quad (2)$$

де в першому наближенні  $x_1(p) = \frac{q(p)}{p^2 + 2h_1p + k_1^2}$ .

### Вплив лінійних прискорень

Розглянемо вплив зворотного зв'язку на величину і характер проходження сигналу лінійного прискорення.

Для цього в рівняннях (1) прийемо  $u = 0$ :

$$\begin{cases} (p^2 + 2h_{21}p + k_{21}^2 + \frac{k_3^2}{2})y_1 + \frac{k_3^2}{2}y_2 = W_Y(p); \\ \frac{k_3^2}{2}y_1 + (p^2 + 2h_{22}p + k_{22}^2 + \frac{k_3^2}{2})y_2 = W_Y(p). \end{cases} \quad (3)$$

Знайдемо спочатку частоти власних незгаючих коливань системи. Для цього знайдемо корені характеристичного поліному

$$p^4 + 2p(k_2^2 + k_3^2/2) + k_2^2(k_2^2 + k_3^2) = 0.$$

Вони дорівнюють

$$\omega_{01}^2 = k_2^2; \quad \omega_{02}^2 = k_2^2 + k_3^2.$$

Таким чином, уведення загального зворотного зв'язку призводить до рознесення частот синфазних і протифазних коливань інерційних мас в пружному підвісі (рис. 2).

Коливання рамок підвісу, викликані дією прискорень, є синфазними. При дії сталого прискорення  $W_Y = const$  з формули (2) одержимо

$$\begin{aligned} y_1(p) &= \frac{W_Y(p)[p^2 + 2h_2p + k_2^2]}{[p^2 + 2h_2p + k_2^2 + \frac{k_3^2}{2}][p^2 + 2h_2p + k_2^2 + \frac{k_3^2}{2}] - \frac{k_3^4}{4}} = \\ &= \frac{W_Y(p)}{p^2 + 2h_2p + k_2^2 + k_3^2} \end{aligned}$$

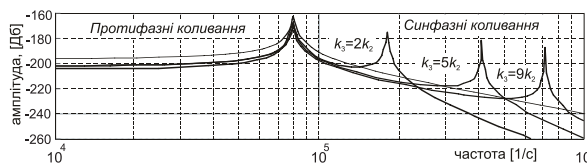


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики пружного підвісу

Після закінчення перехідного процесу усталене значення відхилення  $y_1$  дорівнюватиме

$$\lim_{p \rightarrow 0} y_1 = \frac{W}{k_2^2 + k_3^2}, \text{ тобто буде у } \delta = 1 + \frac{k_3^2}{k_2^2} \text{ разів}$$

меншим, ніж при відсутності зворотного зв'язку.

На рис. 3 наведені графіки перехідних процесів для двох значень  $k_3$

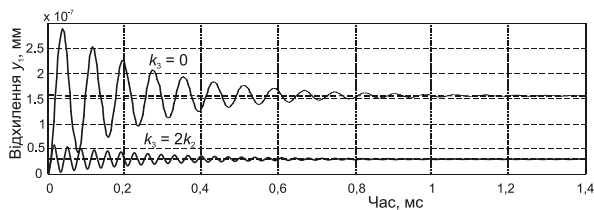


Рис. 3. Реакція ММГ на лінійне прискорення

### Вимірювання кутової швидкості

Вихідний сигнал ММГ  $y_1$  при дії кутової швидкості  $\omega$  згідно з формулою (2) дорівнює

$$y_1(p) = \frac{-2\mu p x_1(p)}{p^2 + 2h_2 p + k_2^2},$$

тобто не залежить від параметрів зворотного зв'язку.

Схема з електричним зворотним зв'язком має істотний недолік – потребує використання достатньо потужних електростатичних актуаторів.

В [2, 7, 8] описана схема побудови багатомасового ММГ з механічними пружними зв'язками між рамками 1 та 2 двох чутливих елементів. Вони реалізовані за допомогою важільного механізму 3 коромислового типу (рис. 4, а). Важіль має кінцеву жорсткість  $c_3$ , величина якої залежить від його геометрії.

Визначимо додаткові сили, що створюються цим пружним елементом. Згідно з механічною моделлю підвісу (рис. 4, б) лінійне зміщення кінців коромисла  $\delta$  при зміщенні рамок двох чутливих елементів на величини  $y_1$  та  $y_2$  дорівнюватиме

$$\delta = \frac{y_1 - y_2}{2}.$$

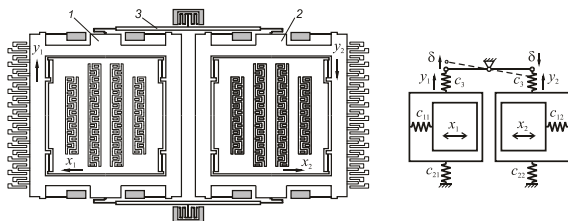


Рис. 4. ММГ з пружними механічними зв'язками:  
а) Схема ММГ з важільними механізмами;  
б) Механічна модель

Звідки впливає формула для визначення додаткових позиційних сил, що прикладені до обох рамок з боку коромисла

$$F_{y1} = F_{y2} = c_3(\delta - y_1) = -\frac{c_3}{2}(y_1 + y_2).$$

Таким чином, структура пружних сил повністю співпадає з структурою сил, які створюються системою зворотного зв'язку по сумі двох вихідних сигналів. Тому і динамічні властивості схеми з механічними пружними зв'язками будуть тотожні розглянутій вище схемі з електричними зв'язками.

### Висновки

Отримані результати доводять, що використання зворотного зв'язку за сумою вихідних сигналів дозволяє здійснити рознесення частот фазних і протифазних коливань, що дає можливість значно зменшити деформації підвісів під дією лінійних прискорень та зменшити їх вплив на формування вихідного сигналу. Показано, що розглянутий метод віброзахисту еквівалентний введенню додаткових механічних зв'язків між рамками підвісів чутливих елементів за допомогою важільних механізмів.

Нааявність додаткових пружних сил не впливає на характер протифазних коливань чутливих елементів, тобто на вимірювання кутової швидкості обертання основи. В подальшому планується дослідити вплив неоднаковості параметрів вимірювачів на точність виміру кутових швидкостей.

### Література

1. Елисеєв Д. П. Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеєв, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2014. – №4. – С. 56 – 68.
2. Sang W. Vibration-induced errors in MEMS tuning fork gyroscopes / W. Sang, S. Lee, K. Najafi // Sensors and Actuators A 180 (2012). – p. 32 – 44.
3. ADXRS150  $\pm 150^\circ/\text{s}$  Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning. Режим доступу: - [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/adxrs150.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/adxrs150.pdf).
4. ADXRS646. High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscopic / Data Sheet. AnalogDevices. – 2012. – p. 12.
5. Пат. 85528 України, МПК G01B 7/02. Микромеханічний гіроскоп / П. М. Бондар, К. В. Лошкар'єва. Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – заявка № u2013005735, опубліковано 25.11.2013, бюл. №22/2013.
6. Борейко А. В. Микромеханічний гіроскоп як вимірювач лінійних прискорень та кутових швидкостей / А. В. Борейко, К. В. Чердиченко, П. М. Бондар // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2015. – Вип. 49(1). – С. 20 – 25.
7. Trusov A. A. Gyroscope Architecture with Structurally Forced Anti-Phase Drive-Mode and Linearly Coupled Anti-Phase Sense-Mode / A. A. Trusov, A. R. Schofield, A. M. Shkel // The 15th International Conference on Solid-State Sensors: Actuators and Microsystems, 2009, pp. 660 – 664.
8. Евстифеев М. И. Использование многомассовых систем для повышения вибростойкости микромеханических гироскопов / М. И. Евстифеев, Д. В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2009. – №1. – С.40 – 44.

УДК 531.534

**А. В. Борейко, К. В. Чередниченко, П. М. Бондарь***Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УПРУГИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ**

Рассмотрена возможность повышения устойчивости к механическим воздействиям микромеханических гироскопов LL типа, построенных по дифференциальной схеме, за счет использования общих отрицательных обратных связей по сумме выходных сигналов. Показано, что такая схема эквивалентна схеме с упругой механической связью, создаваемой дополнительным рычажным механизмом, обеспечивающим кинематическую связь рамок двух чувствительных элементов. Разработана и проанализирована математическая модель микромеханического гироскопа с учетом механической связи в условиях вибрационных воздействий и постоянных ускорений. Доказано, что в исследуемой схеме для снижения чувствительности к вибрациям реализуется метод разнесения частот синфазных и противофазных колебаний инерционных масс в упругом подвесе.

**Ключевые слова:** микромеханический гироскоп, чувствительный элемент, виброустойчивость, угловая скорость, линейное ускорение.

**A. V. Boreyko, E. V. Cherednychenko, P. M. Bondar***National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***APPLICATION OF ELASTIC MECHANICAL CONNECTION FOR INCREASING VIBRATION RESISTANCE MICROMECHANICAL GYROSCOPE**

The possibility of increasing resistance to mechanical stress micromechanical gyroscopes LL type, constructed by a differential circuit, through the use of common negative feedbacks on the sum of the output signals. It has been shown that such a scheme is equivalent to the circuit with an elastic mechanical linkage, create additional lever mechanism, providing a kinematic connection framework two sensing elements. Developed and analyzed a mathematical model micromechanical gyroscope taking into account the mechanical connection in the conditions vibration effects and constant acceleration. It is proved that in the study scheme to reduce sensitivity to vibration implemented method diversity frequency phase and antiphase oscillations of the inertial mass in an elastic suspension.

**Keywords:** micromechanical gyroscope, sensing element, vibration resistance, angular velocity, linear acceleration.

*Надійшла до редакції  
17 лютого 2016 року*

*Рецензовано  
02 березня 2016 року*

© Борейко А. В., Чередниченко К. В., Бондар П. М., 2016

УДК 531.76

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ БИСО НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА***Лазарев Ю. Ф., Сандий А. А.**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина**E-mail: [aellalaz@gmail.com](mailto:aellalaz@gmail.com), [asandiy@ukr.net](mailto:asandiy@ukr.net)*

*Синтезированы алгоритмы различных приближений для определения параметров ориентации в бесплатформенной инерциальной системе ориентации (БИСО), входящей в состав бесплатформенной инерци-*