

В. В. Чіковані¹, *д.т.н., професор*

ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА НА ОСНОВІ КВАРЦОВОГО ПІВСФЕРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА БЕЗ НІЖКИ

Уа У роботі розглянути проблеми виготовлення складового без зубцевого кварцового півсферичного резонатора, що складається з ніжки та півсфери, які виготовляються окремо з використанням стандартних технологій виготовлення сферичних та циліндричних лінз. Після чого ці два вироби з'єднуються шляхом глибокого оптичного контакту. При цьому зростає технологічність та зменшується вартість виробу. Крім того, при виготовленні півсфери зростає якість обробки півсфери, що призводить до зменшення різночастотності резонатора. У роботі порівнюються динамічні параметри виготовлених складових резонаторів на другій та третій модах коливань. Для подальшого зменшення вартості виготовлення чутливого елемента розглядається не стандартний варіант побудови вібраційного гіроскопа на основі кварцового півсферичного резонатора без ніжки, що використовує третю моду коливань та детально аналізуються його переваги та недоліки у порівнянні зі традиційним вібраційним гіроскопом з кварцовим резонатором, виготовленим з цільного шматка кварцу.

Еп У роботі розглянути проблеми виготовлення складового без зубцевого кварцового півсферичного резонатора, що складається з ніжки та півсфери, які виготовляються окремо з використанням стандартних технологій виготовлення сферичних та циліндричних лінз. Після чого ці два вироби з'єднуються шляхом глибокого оптичного контакту. При цьому зростає технологічність та зменшується вартість виробу. Крім того, при виготовленні півсфери зростає якість обробки півсфери, що призводить до зменшення різночастотності резонатора. У роботі порівнюються динамічні параметри виготовлених складових резонаторів на другій та третій модах коливань. Для подальшого зменшення вартості виготовлення чутливого елемента розглядається не стандартний варіант побудови вібраційного гіроскопа на основі кварцового півсферичного резонатора без ніжки, що використовує третю моду коливань та детально аналізуються його переваги та недоліки у порівнянні зі традиційним вібраційним гіроскопом з кварцовим резонатором, виготовленим з цільного шматка кварцу.

Вступ

Унікальні технічні характеристики вібраційного гіроскопа з півсферичним кварцовим резонатором [1] стимулюють високотехнологічні країни світу розробляти та вдосконалювати цей варіант вібраційного гіроскопа. Однак, вартість виготовлення цього гіроскопа є достатньо велика, в ос-

новному за рахунок не технологічності виготовлення півсферичного кварцового резонатора з цілого шматка кварцу з двома або однією ніжкою.

Для зростання технологічності виготовлення кварцового резонатора і, таким чином, зменшення вартості його виготовлення, Українськими спеціалістами було запропоновано розробити складовий резонатор [2], що складається із ніжки і півсфери, які виготовлюються окремо із використанням добре відпрацьованих у виробництві технологій виготовлення циліндричних та сферичних лінз. Після чого, два вироби з'єднуються шляхом глибокого оптичного контакту. Для прискорення з'єднання вироби містилися у термокамеру при температурі 90-100°C на 4 години. Виробництво складових резонаторів зменшило вартість його виготовлення приблизно у 5 разів. Однак, не співвісність осі циліндричної ніжки та радіусу півсфери у точці їх з'єднання призводять до зростання асиметрії конструкції і, як слідство, до зростання різночастотності.

Для подолання цього недоліку, а також для подальшого зменшення вартості виробництва кварцових резонаторів було запропоновано не традиційну конструкцію чутливого елемента без ніжки [3]. У запропонованій конструкції півсфера кріпиться на п'єзо-кільце поблизу її полюсу так, що саме полюс залишається вільним.

Постановка задачі

У роботі розглянути проблеми виготовлення складового без зубцевого кварцового півсферичного резонатора, приводяться динамічні характеристики складового резонатора на другій та третій моді коливань, розглядається чутливий елемент без ніжки з п'єзо-кільцем, що працює на третій моді коливань та аналізуються його переваги й недоліки.

Аналіз параметрів складового резонатора

Ідея складового резонатора заснована на тому, що вектор ортогональної компоненти коливань півсферичного резонатора поблизу свого полюса близький до нуля.

Рис. 1 показує три компоненти переміщення точки на поверхні півсферичного резонатора. Для ідеального резонатора можна отримати рішення для n -ої моди коливань, в апроксимації Релея у наступному вигляді [4]:

$$\begin{aligned} U &= U_n(\varphi)q_n(t)\cos(n\theta); = V_n(\varphi)q_n(t)\sin(n\theta); \\ W &= W_n(\varphi)q_n(t)\cos(n\theta), \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$U_n(\varphi) = V_n = \operatorname{tg}^n\left(\frac{\varphi}{2}\right)\sin\varphi,$$

$$W_n(\varphi) = \operatorname{tg}^n\left(\frac{\varphi}{2}\right)(n + \cos\varphi),$$

φ – кут широти півсфери, θ – кругова координата,
 $q_n(t)$ – часова компонента амплітуди коливань.

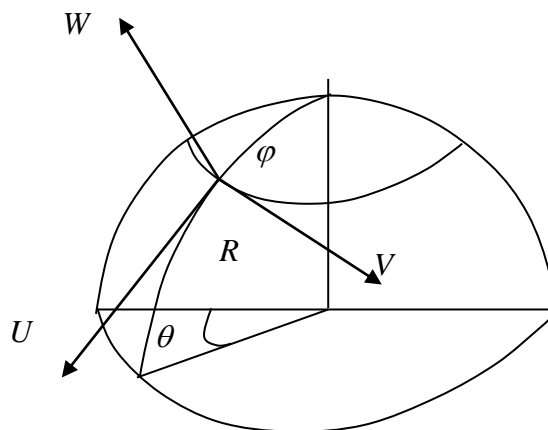


Рис. 1. Переміщення точки на поверхні півсферичного резонатора

Залежність відношення $W(\varphi)/W_{max}$ амплітуд ортогональних коливань від кута φ широти півсфери для другої та третьої мод коливань півсферичних резонаторів, представлені на рис. 2.

Для не ідеального резонатора у роботі [5] були отримані оцінки значення ортогональної компоненти амплітуди коливань для моди $n=2$.

Виміри для двох мод коливань для реального півсферичного резонатора представлені у роботі [6]. За цих вимірах малогабаритні ємнісні датчики були розташовані вдовж меридіану півсфери, а їх виходи подавалися на осцилограф. Результати вимірів добре погоджуються із залежностями представленими на рис. 2.

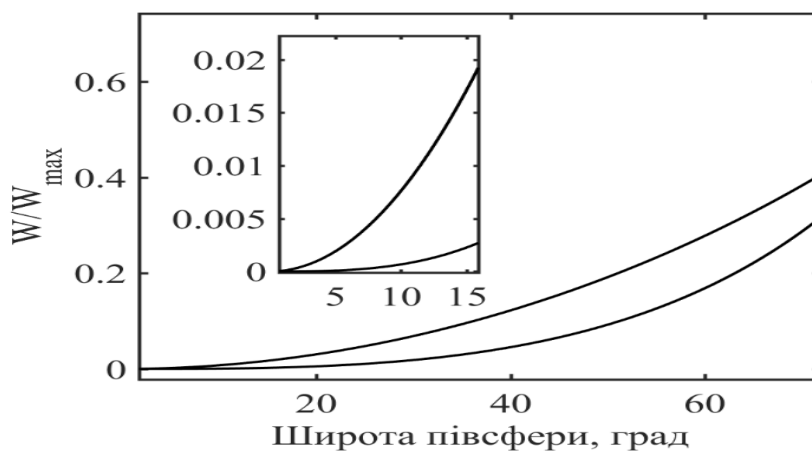


Рис. 2. Залежність нормалізованої амплітуди вібрації від широти φ півсфери для $n=2$ (a) та $n=3$ (b) мод коливань

Як можна бачити із рис. 2 поблизу полюсу півсфери, де ніжка з'єднається з півсферою, для кутів $\varphi \leq 15$ град., для другій моді коливань амплітуда ортогональних вібрацій дорівнює $\sim 0,02$ (крива *a*) від максимальної, яка реалізується при $\varphi = \pi/2$, а для третьої мод коливань вона дорівнює $\sim 0,003$ (крива *b*).

У подальшому були виготовлені більше 40 складових резонаторів діаметром 30 мм, її компоненти та результат з'єднання цих компонентів представлені на рис. 3.

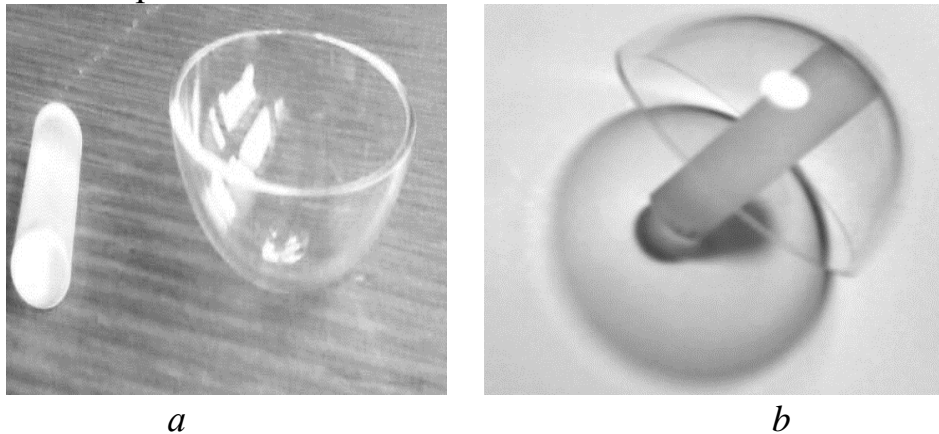


Рис. 3. Дві частини складового півсферичного резонатора (*a*) із плавненого кварцу діаметром 30 мм та їх збірка (*b*)

Під час виготовлення півсфери та ніжки користувалися серійними технологіями виготовлення сферичних та циліндричних лінз та методами контролю якості поверхні та розмірів прийнятих в оптичній промисловості.

Параметри виготовлених складових резонаторів представлені у табл. 1 [7]. Як бачимо із таблиці добротність моди $n=3$ більше добротності моди $n=2$ для складового резонатора. Це обґрунтовується тим, що поблизу полюсу півсфери там, де ніжка з'єднується із півсферою і порушується однорідність матеріалу у межі з'єднання, характер взаємодії двох з'єднаних елементів визначається амплітудою їх взаємного пересування, а також пружністю контакту. Як слідує з графіку представленому на рис. 2, для півсферичного резонатора на третій моді коливань це пересування значно менше ніж для другій моді коливань.

Таблиця 1.

Параметри виготовлених складених резонаторів

Параметр	Значення
Діаметр, мм	~ 30
Відхилення від сферичності, інтерф. кільця	≤ 1
Різнововітність півсфери, мкм	$\sim 0,5$
Шираховатість поверхні півсфері, мкм	$\leq 0,032$
Резонансна частота моди $n=2$, Гц	~ 5600

П р и л а д и т а м е т о д и к о н т р о л ю

Параметр	Значення
Різничастотність моди $n=2$, Гц	0,1-0,6
Добротність моди $n=2$	$1 \div 3 \times 10^6$
Резонансна частота моди $n=3$, Гц	~ 14000
Різничастотність моди $n=3$, Гц	0,1-0,4
Добротність моди $n=3$	$3 \div 5 \times 10^6$
Не ортогональність осі ніжки плоскості півсфери у місці з'єднання, кут. хвилини	$1 \div 5$
Резонансна частота згинальних коливань ніжки, Гц	~ 3750
Різничастотність півсфери без ніжки, Гц	$0,01 \div 0,05$

У роботі [8] зазначається, що за малих взаємних переміщеннях, менше ніж 10^{-2} мкм, сили взаємодії носять консервативний характер, а при більших переміщеннях вони носять дисипативний характер, тобто трансформуються у тепло.

Амплітуда коливань кварцового резонатора, коли кут φ дорівнює 90° , тобто на екваторі півсфери, дорівнює приблизно $1 \div 2$ мкм, це означає, що близько до місця кріплення ніжки до півсфери, тобто для $\varphi < 15$ град їх взаємне переміщення для третьої моди коливань є $0.003 \times (1 \div 2) < 10^{-2}$ мкм, а для другої моди це переміщення є $0,02 \times (1 \div 2) > 10^{-2}$ мкм. Тому добротність моди $n=2$ менше добротності моди $n=3$ для півсферичного резонатора.

Крім того, як слідує із табл. 1, різничастотність не балансованих півсфер (без ніжки) значно менше, ніж із ніжкою. Це обумовлено не ортогональністю осі ніжки до плоскості півсфери у місці з'єднання, тобто нахилом ніжки відносно радіусу півсфери. Із той ж таблиці слідує, що цей нахил є у діапазоні $1 \div 5$ кут. хв. Ця асиметрія приводить до похибки еквівалентної різничастотності, яку можна оцінити за виразом $\Delta f_3 = 2f_3 \delta \theta / (35\pi)$ [9]. Розрахунки показують, що більша частина різничастотності складового резонатора обумовлена саме нахилом ніжки. Таким чином, якщо використовувати тільки півсферу без ніжки у якості резонатора для чутливого елемента вібраційного гіроскопа, то ґрунтуючись на результатах вимірювань поданих у табл. 1, не треба буде проводити процедуру балансування шляхом усунення маси, яка є складною та довготривалою процедурою, оскільки різничастотність півсфери після виготовлення має різничастотність придатну для електричного балансування.

Чутливий елемент без ніжки

У чутливому елементі без ніжки півсфера кріпиться на п'єзо-кільце, наприклад, за допомогою клею або епоксидної смоли. П'єзо-кільце може

бути зі п'єзокераміки або іншого п'єзо матеріалу. Поліус півсфери розташований безпосередньо над отвором п'єзо-кільця, як показано на рис. 4 [3].

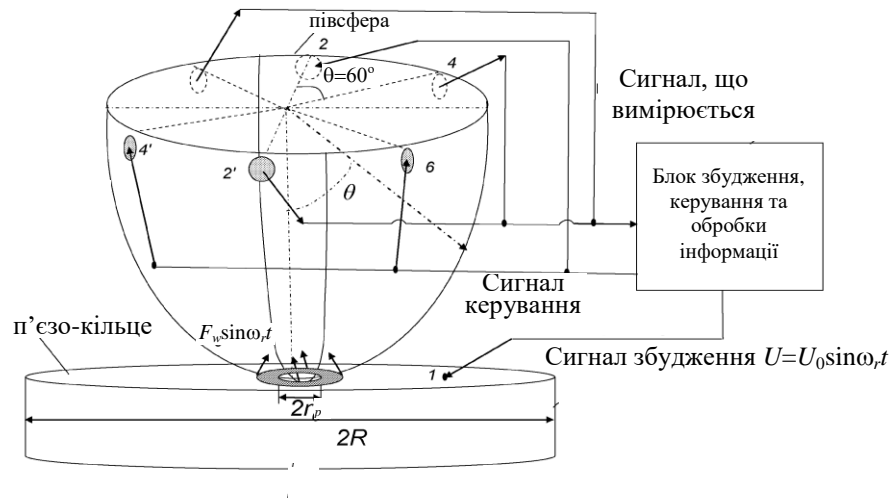


Рис. 4. Півсферичний резонатор без ніжки закріплений на п'єзо-кільці

В околицях малого радіусу r_p поліус півсфери є вільний, завдяки отвору того ж радіусу, висвердленому у півсфері, що дорівнює радіусу малого отвору у п'єзокільці.

П'єзо-кільце може бути суцільним або сегментованим. У випадку сегментованого кільця його провідна металізована поверхня повинна бути розділена на 12 сегментів для роботи на третій моді коливань. Третя мода коливань має 6-ть вузлів та 6-ть пучностей, у кожний з яких є електрод, як показано на рис. 5. На сегменти подаються сигнали збудження, керування та знімаються сигнали, що вимірюються.

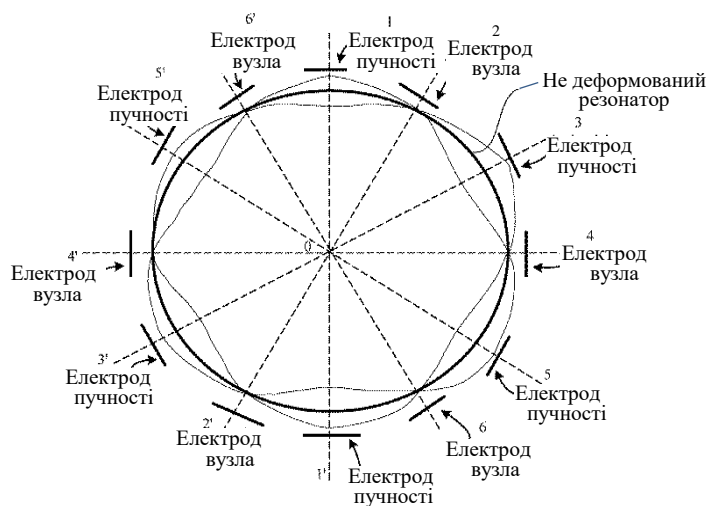


Рис. 5. Третя мода вібрації півсферичного резонатора та розташування електродів

У випадку не сегментованого кільця, єдина напруга збудження, що подається є аналогом параметричного збудження. Для реалізації керування та вимірювання використовуються ємнісні електроди, що розташовані навколо екватору півсфери, як показано на рис. 4.

Третя мода коливань кварцового резонатора, що представлена на рис. 5 має шість діаметрально протилежних пучностей стоячої хвилі розташованих вдовж осей 1-1', 3-3' та 5-5', а також шість вузлів розташованих вдовж осей 2-2', 4-4' та 6-6'. Процес збудження півсферичного резонатора за допомогою не сегментованого п'єзо-кільця забезпечується подачею напруги на п'єзо-кільце на частоті резонансу третьої моди. Ця напруга визиває рівномірно розподілену вдовж окружної координаті θ внутрішнього кільця силу F_1 , яка має наступний вигляд:

$$F_1 = \frac{d_{31} E_p h_p R_p}{r_p} U, \quad (2)$$

де d_{31} – п'єзоелектричний модуль кільця, E_p – модуль Юнга кільця, h_p – товщина кільця, R_p – зовнішній радіус кільця, r_p – внутрішній радіус кільця, U є прикладена напруга.

Нормальна до півсфери компонента сили F_1 , яку позначимо F_n , дорівнює:

$$F_n = \frac{r}{R} F_1, \quad (3)$$

де R – радіус півсфери, $r = r_p + w(\theta)$, $w(\theta)$ – амплітуда радіальної деформації у процесі коливань півсфери.

Для малих переміщень w змінна компонента сили, що діє на резонатор буде визначатися наступним виразом:

$$F_w \approx \frac{d_{31} E_p h_p U}{R r_p} w. \quad (4)$$

Враховуючи, що для моди $n=3$ при малих кутах φ вираз (1) запишеться як:

$$w(\varphi) = w\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right) (n+1) \left(\frac{r_p}{2R}\right)^n = 4w_{max} \left(\frac{r_p}{2R}\right)^3, \quad (5)$$

де w_{max} – максимальна амплітуда коливань півсферичного резонатора, що є навколо його відкритого кінця, де $\varphi = \pi/2$.

Таким чином, амплітуда сили на частоті третьої моди, що прикладається до резонатора дорівнює:

$$F_w \approx 4 \frac{d_{31} E_p h_p U}{R r_p} w_{max} \left(\frac{r_p}{2R}\right)^3 = \frac{d_{31} E_p h_p U}{2R^4 r_p^2} w_{max}. \quad (6)$$

Коли сила F_w маючи амплітуду (6) прикладається до резонатору на частоті третьої моди коливань або близької до неї, то збуджуються коливання вібраційна картина якої представлена на рис. 5. Відмітимо, що у порівнянні із ємнісним збудженням, сила F_w лінійно залежить від напруги, що подається. Це означає, що для збудження третьої моди коливань треба подавати напругу на частоті саме цей моди. У процесі коливань у точках, де амплітуда коливань та деформація резонатора максимальна, тобто у пучностях хвилі, сила, що діє на резонатор буде більше, ніж сила, де амплітуда коливань мінімальна, тобто у вузлах хвилі. У цьому випадку жорсткість з'єднання резонатора з п'єзо-кільцем відіграє важливу роль, бо саме вона визначає максимальну амплітуду вібрації.

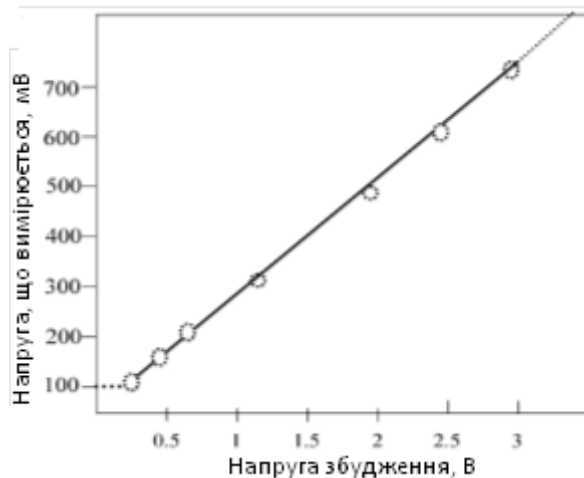


Рис. 6. Характеристика збудження півсферичного резонатора від не сегментованого п'єзо-кільця

На рис. 6 представлений графік залежності амплітуди напруги відклику на збудження, що знімається з ємнісних електродів розташованих на екваторі півсфери (де $\varphi \approx \pi/2$), від амплітуди напруги збудження, що подається на п'єзо-кільце. Ліва пунктирна частина залежності визначається втратами резонатора, коли напруги не вистачає для збудження відповідної моди коливань. Як бачимо з графіку, при подання напруги із амплітудою 1 В на п'єзо-кільце, отримуємо $0,3\text{ В}$ амплітуди відклику, а при амплітуди напруги 3 В відклик буде значно переважати шуми, забезпечуючи зростання відношення сигнал/шум.

Для порівняння зі стандартним збудженням (для другої моди коливань) за допомогою ємнісних електродів, треба прикладати напругу із амплітудою 400 В на частоті у 2 рази меншою, ніж частота відповідної моди коливань на дискретні електроди для початку коливань, а потім, для підтримки вже збуджених коливань, амплітуду напруги можна зменшити до $50 \div 60\text{ В}$, яка прикладається до кільцевого електроду.

Сигнали керування для чутливого елемента представленого на рис. 4, для не сегментованого (суцільного) п'єзо-кільця прикладаються до

ємнісних електродів 2', 4', 6', а знімання сигналів проводиться із електродів 2, 4, 6 (рис. 5). Недолік цієї схеми є те, що перед подачею сигналу керування на ємнісні електроди 2', 4', 6' їй частоту треба зменшити у 2 рази, що потребує додатковий дільник частоти та підсилювач, бо ємнісні сили мали і треба подавати велику напругу для компенсації, наприклад, кутової швидкості, коли датчик працює у режимі вимірювання кутової швидкості.

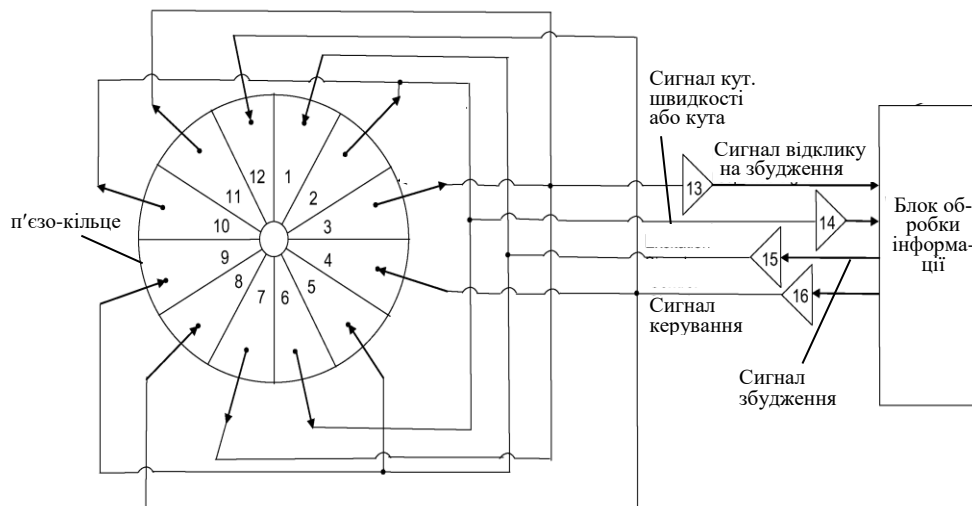


Рис. 7. Сегментоване п'єзо-кільце та його сигнали

Рис. 7 показує схему вимірювання та керування коливаннями за допомогою сегментованого п'єзо-кільця [3]. Сигнали діляться на групи по три сегменти, що розташовані через рівні кути 120° . Сигнали подаються на сегменти 1, 5, 9 для збудження третьої моди коливань. Сигнали відклику на збудження знімаються з електродів 3, 7, 11. Вони використовуються для стабілізації амплітуди коливань за допомогою позитивного зворотного зв'язку. Сигнали пригнічення квадратури подаються на сегменти 4, 8, 12 та визначаються негативним зворотним зв'язком. Сигнали з сегментів 2, 6, 10 несуть корисний сигнал, який після демодуляції, є пропорційний кутової швидкості, якщо гіроскоп працює у режимі вимірювання кутової швидкості, або кута, якщо гіроскоп працює у режимі вимірювання кута.

На рис. 8 представлена залежність амплітуди вібрації півсферичного резонатора на його екваторі ($\varphi = \pi/2$), що вимірюється ємнісним електродом, від амплітуди напруги, що прикладається до відповідного сегменту п'єзо-кільця розташованого безпосередньо під ним. Монотонна залежність близько до параболічної показує, що за допомогою керованої напруги даної до відповідного сегменту кільця можна стабілізувати амплітуду коливань.

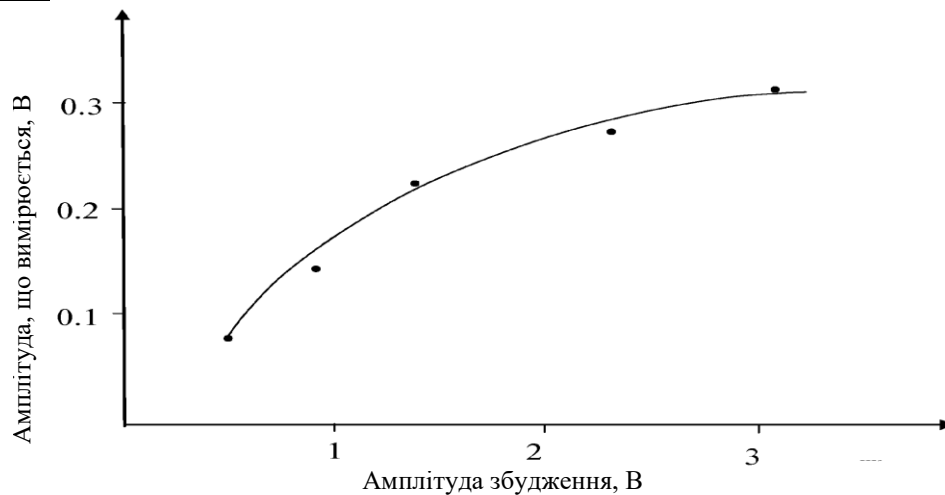


Рис. 8. Характеристика збудження півсферичного резонатора від сегментованого п'єзо-кільця

Переваги вібраційного гіроскопа із півсферичним кварцовим резонатором без ніжки є, насамперед, низька вартість його виготовлення, зростання технологічності, за рахунок того, що резонатор є півсфера, яка виготовляється із використанням добре відпрацьованих технологій виготовлення сферичних лінз, а також відсутність необхідності балансування шляхом усунення мас, що тягне за собою можливість організації масового виробництва. Крім того, зменшення потужності споживання, спрощення електронного блоку за рахунок того, що нема необхідності використання перетворювача напруги для збудження коливань та спрощення конструкції чутливого елементу у цілому.

Недоліки є у тому, що конструкція чутливого елементу використовує з'єднання двох різнорідних матеріалів п'єзокераміки та плавленого кварцу, що може призвести до проблем при використанні приладу на змінних температурах. Крім того, недостатня міцність кріплення півсфери до п'єзо-кільця можуть створити проблеми під час роботи в умовах механічних ударів та вібрацій.

Висновки

Чутливий елемент складового півсферичного кварцового резонатора, був розроблений з ціллю здешевлення вартості виготовлення кварцового резонатора за рахунок використання добре відпрацьованих технологій виготовлення сферичних та циліндричних лінз. Як результат вартість виготовлення знизилася приблизно до 5 разів. Проте, точність з'єднання ніжки та півсфери призводить до збільшення різночастотності та потребує трудомісткого балансування мас, що знижує технологічність виготовлення пристрою.

Відмова від ніжки та перехід на третю моду коливачів із метою збільшення добротності та зменшення різночастотності призводить до подальшого зменшення вартості та зростання технологічності виготовлення, без зменшення точності, бо добротність резонатора зростає. Як результат, конструкція резонатора без ніжки є привабливою з точки зору організації масового виробництва.

Крім того, спрощується конструкція електронного блоку, за рахунок відсутності необхідності використання перетворювача напруги для збудження коливачів та попереднього посилення вимірюваних сигналів.

Список використаної літератури

1. Чіковані В. В., Головач С. В. «Стан та перспективи розвитку вібраційної гіроскопії в Україні та у світі», *Механіка гіроскопічних систем*, № 41, 2021, с. 61–87.
2. Yatsenko Yu. A., Petrenko S. F., Chikovani V. V., Vovk V. V. “The Compound Hemispherical Resonator for Small-Sized Gyro of Commercial Navigation Systems”.- *Integrated Navigation Systems:7-th int. conf.*, 29-31 May 2000.– СПб: Изд-во ЦНИИ “Электроприбор”, 2000.– С. 199-201.
3. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V. A., Scherban V. I. “Stemless Hemispherical Resonator Gyroscope”, US Patent, # 7637157, G01P 9/04, Dec. 29, 2009.
4. J. W. Strett (Losrd Rayleigh) “The theory of sound”, v. 1, Dover Publ., 2 edition, 1945, P. 500.
5. Збруцкій А. В., Саранулов С. А., Локот Н. М. «Твердотільний хвильової гіроскоп з неідеальним резонатором», *Механіка гіроскопічних систем*, № 9, 1990, с. 15–20.
6. Yatsenko Yu. A., Petrenko S. F., Chikovani V. V., Vovk V. V. “Comparative investigations of vibrating gyroscope resonators design features”, *The 4-th S. Petersburg Int. Conf. on Integrated navigation systems*, S. Petersburg, May 26–28, 1997, p. 357–361.
7. Yatsenko Yu. A., Petrenko S. F., Vovk V. V., Chikovani V. V. “Technological aspects of manufacturing of compound hemispherical resonators for small-sized vibratory gyroscopes”, *The 6-th S. Petersburg Int. Conf. on Integrated navigation systems*, S. Petersburg, May 24–26, 1999, pp. 7.1–7.6.
8. Смагин А. Г., Ярославский М. И. “П’єзоелектричество кварцу та кварцові резонатори”, М.: Енергія, 1970 (на російській мові).

9. *Yatsenko Yu. A., Petrenko S. F., Chikovani V. V., Vovk V. V.* “Compound hemispherical resonators for small-sized vibratory gyroscopes for commercial navigation systems”, 7-th S. Petersburg Int. Conf. on Integrated navigation systems, S. Petersburg, May 29–31, 2000, p. 199–201.