

УДК 621.317

Безвесільна О. М.*, д.т.н., професор; **Цірук В. Г.***, докторант; **Ткачук А. Г.****, асистент

* Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

** Житомирський державний технологічний університет

КОРІОЛІСОВИЙ ВІБРАЦІЙНИЙ ГІРОСКОП, ЯК ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ КОМПЛЕКСУ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ

У статті розглянуто новий коріолісовий гіроскоп (КВГ) – датчик кутової швидкості (ДКШ) системи стабілізації навігаційного комплексу сучасної легкої броньованої техніки. КВГ відрізняється від традиційних електромеханічних гіроскопів підвищеною надійністю й довговічністю, тому що не містить обертових частин, широкою смугою пропускання й стійкістю до механічних впливів. Зазначені датчики мають широку галузь застосування, у тому числі - стабілізації платформ із установленими на них вимірювальними пристроями й у системах керування рухомими об'єктами різного класу, у вимірювальних блоках для інерціальної навігації. З урахуванням отриманих результатів було проведено моделювання роботи стабілізатора із введенням ДКШ-КВГ у вертикальний канал стабілізатора, тому що на вертикальний канал діють найбільш інтенсивні впливи. Як показали результати моделювання, підвищення смуги пропускання призводить до поліпшення завадостійкості системи й дозволяє забезпечити вимоги щодо її жорсткості, оскільки знижує коливання при досить високому коефіцієнті підсилення.

Коріолісовий гіроскоп, система стабілізації.

Постановка проблеми. З метою забезпечення високої точності системи стабілізації навігаційного комплексу легкої броньованої техніки, високі вимоги пред'являються до датчиків кутової швидкості. Останнім часом на ПАТ “НВО “КЗА ім. Г.І. Петровського” розроблено новий високоточний КВГ. Отримані результати цих робіт відображено у наукових працях авторів [1-6].

Конструкція резонатора КВГ має бути такою, яка забезпечує ідентичність двох мод коливань (первинної і вторинної). Оскільки в цьому випадку забезпечується максимальна точність, тобто КВГ має відноситись до другого класу гіроскопів. Конструкція повинна мати осьову симетрію. Існують дві геометричні фігури, що мають високу осьову симетрію: сфера і циліндр. Сфера або півсферична оболонка має максимальну осьову симетрію і на основі цієї геометричної фігури створені півсферичні кварцові КВГ, які в іноземній літературі скорочено називають HRG (Hemispherical Resonator Gyroscope). Резонатор цього гіроскопа має добротність 5 - 10 мільйонів і збуджується електростатичними (безконтактними) електродами. Такий резонатор не технологічний у виробництві і, як наслідок, дорогий у виготовленні, його складно балансувати і для балансування потрібно дороге устаткування [5-6].

Аналіз наукових досліджень. Проведені дослідження показали, що великий внесок у теорію та практику гіроскопічних чутливих елементів, датчиків кутової швидкості, систем стабілізації в СНД було зроблено низкою видатних вчених: А.О. Одинцовим, Б.Б. Самотокіним, О.В. Збруцьким, М.А. Павловським, В.В. Карачуном, В.В. Чіковані та іншими [1-3].

Метою статті є створення високотехнологічного, дешевого КВГ, що забезпечує високу точність вимірів, що не поступається його основним конкурентам: волоконно-оптичному і лазерному гіроскопу.

Викладення основного матеріалу роботи.

Для збільшення технологічності і зменшення вартості виготовлення резонатора його слід виготовляти з металу. Проте, метал має невисоку, у порівнянні з кварцом, добротність і його практично неможливо збудити електростатичними силами, оскільки вони занадто слабкі. Іншими перспективними електродами, які можуть вимірювати субмікронні переміщення, являються п'єзокерамічні електроди. П'єзоелектроди наклеюються на резонатор. Якщо п'єзоелектроди наклеїти на робочу вібруючу частину резонатора (на його обід), то добротність резонатора впаде у декілька разів (до 10 разів). Крім того, п'єзоелектроди не можна клеїти на круглу поверхню, оскільки при цьому виникають початкові збуджуючі деформації і потенціали, що негативно впливають на точність приладу. Тому, для металевого резонатора не доцільно використати півсферичну геометрію, в якій немає плоских частин, а слід використати циліндричну геометрію і електроди клеїти на плоске дно циліндра.

У циліндричній конструкції є дві переваги, в перших, електроди клеяться на плоску поверхню і, в других, електроди розташовані на максимальнім видаленні від робочої віброуючої частини циліндра і, отже, мінімально впливають на добротність. Для збільшення передачі енергії коливань на дно циліндра слід передбачити збільшення товщини обода відносно його дна, а для зменшення впливу розтягуючи (дотичних) зусиль, що діють з боку пучностей на вузли коливань, слід виконати отвори на дні циліндра, що розривають механічний зв'язок між вузлами і пучностями у місцях розташування електродів.

Збудження пружних стоячих хвиль в циліндричному резонаторі і знімання сигналу робиться вісьмома п'езодатчиками, приклеєними на дно циліндра. Змінний сигнал збудження подається на пару діаметрально протилежних п'езодатчика на частоті, близькій до частоти другої моди коливання резонатора. Вигинисті деформації п'езодатчиків викликають радіальні коливання циліндричної оболонки. В результаті в резонаторі виникає пружна стояча хвиля по другій моді пружних коливань з чотирма пучностями, точками максимальної амплітуди коливань (1, 3, 5, 7) і вузлами, точками мінімальної (у ідеалі нульової) амплітуди коливань (2, 4, 6, 8), як показано на рис.1. При обертанні циліндричного резонатора навколо своєї осі симетрії з кутовою швидкістю Ω , виникають сили Кориоліса, які викликають вібрацію вузлів і вимірюються п'езодатчиками, які розташовані у вузлах коливань. Амплітуда цих коливань пропорційна кутовій швидкості.

Вузол кріплення резонатора виконують у вигляді циліндричної склянки циліндричного резонатора, що вивернутий всередину, бічна внутрішня поверхня якого є базовою площиною для кріплення резонатора до основи, а датчики збудження і знімання інформації розташовуються на спицях, які утворилися після виконання отворів на дні циліндра. На рис.2 показано дно циліндричного резонатора з приклеєними п'езодатчиками.

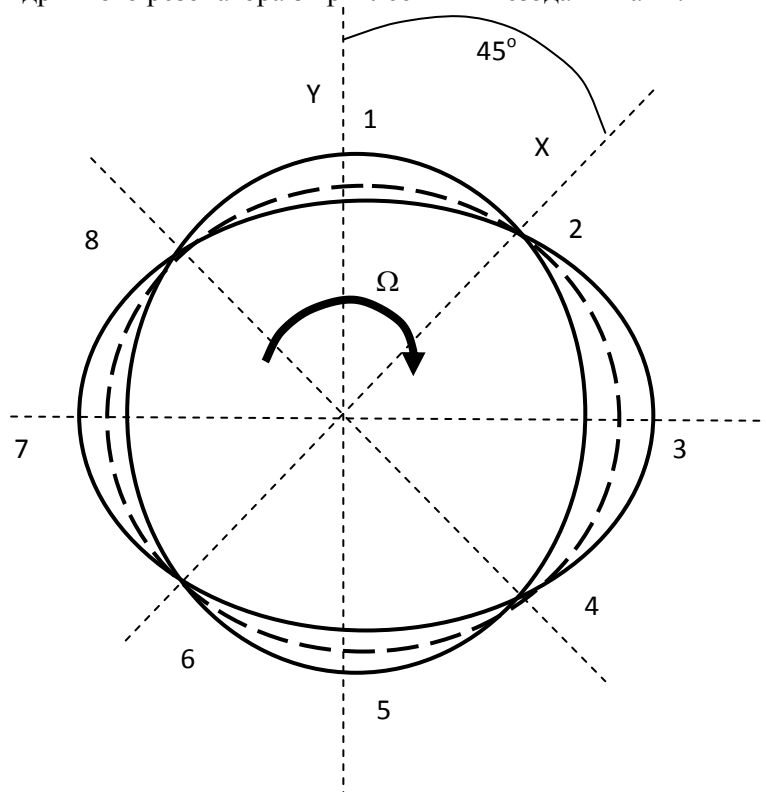


Рис. 1. Стояча хвиля в циліндричному резонаторі

Отвори можуть бути круглі, овальні або іншої форми, але такими, щоб між ними утворювалися спиці, на яких кріпляться датчики збудження і знімання інформації. Електроди знімання інформації можуть бути ємнісні, оптичні, електромагнітні або інші, але доцільно і технологічно їх робити уніфікованими. Якщо електроди збудження мають бути п'езокерамічними, то в якості електродів знімання, для збереження балансу мас і уніфікації, їх слід також робити п'езокерамічними.

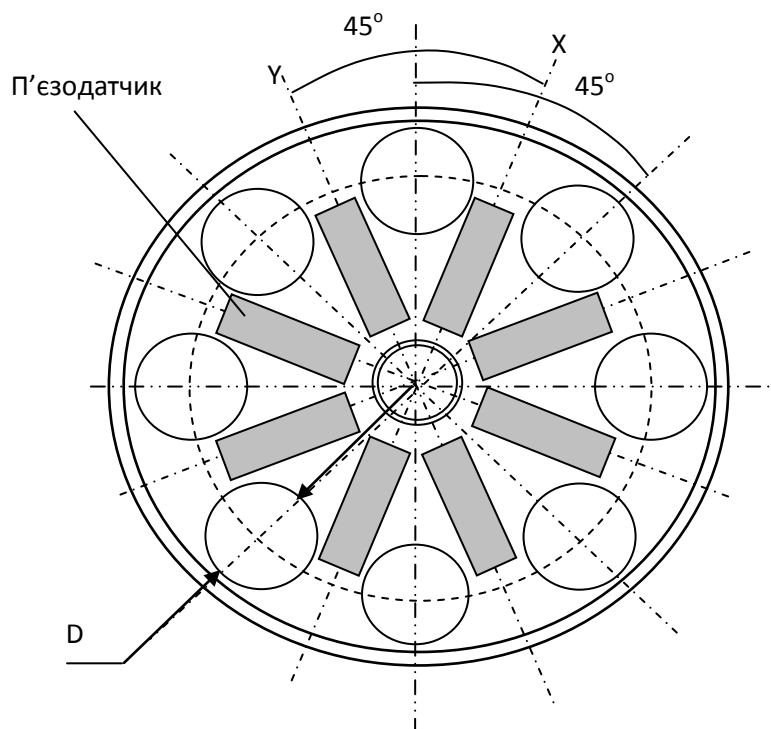


Рис. 2. Дно циліндричного резонатора

Вузол кріплення резонатора показано на рис. 3.

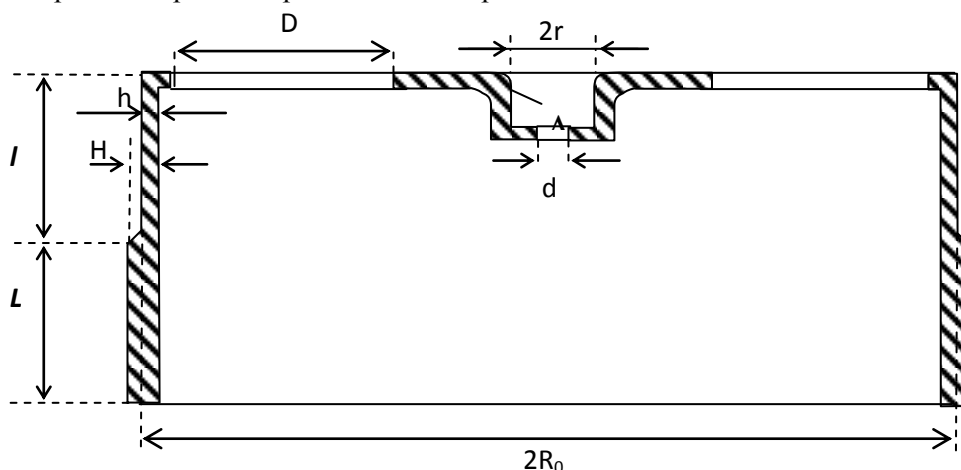


Рис. 3. Резонатор з циліндричним вузлом кріплення

Слід зазначити, що оскільки товщина циліндричної частини пружного підвісу менше товщини обода $h < H$, то його власна частота зміщена у нижній діапазон частот. Це видно з виразу для резонансної частоти циліндричної оболонки:

$$\omega_i = K(i) \frac{h}{R_0^2} \sqrt{\frac{E}{(1+\nu)\rho}}, \quad (1)$$

де $K(i) = \frac{i(i^2 - 1)}{\sqrt{(i^2 + 1)}}$ – коефіцієнт, залежний від номера i моди коливань; E – модуль Юнга;

ν – коефіцієнт Пуассона; ρ – щільність матеріалу.

У результаті цього досягається частотна розв'язка між робочою частотою коливань (резонансною частотою обода) і частотою підвісу (нижній частині циліндра), на якій розташовано обід. Тому пружний підвіс в такій конструкції виконує роль демпфера при дії зовнішніх збурень – вібрацій і ударів. Крім того, параметри пружного підвісу вибирають так, щоб його ча-

стота була вища за максимальну частоту в спектрі діючих зовнішніх збурень, який знаходиться, як правило, в діапазоні частот до 2000 Гц.

Зменшення товщини пружного підвісу призводить до зменшення його моменту інерції і, тим самим, знижує вимоги до точності виготовлення і до рівності пружних властивостей спиць. Це видно із співвідношення моментів інерції кільцевого обода M_K і підвісу $M_{пд}$, приведених до амплітуди коливань резонатора:

$$\frac{M_{пд}}{M_K} = \left(\frac{h}{H} \right)^2 \quad (2)$$

Тому при виконанні співвідношення $\frac{h}{H} \leq \frac{1}{4}$ вимоги до точності виконання пружного підвісу зменшуються (ослабляються) більше, ніж на порядок. Високі вимоги до точності геометричної форми і пружних властивостей накладаються тільки на обід резонатора, що значно підвищує технологічність і, отже, знижує вартість його виготовлення.

Дно резонатора і менша по товщині нижня частина циліндра виконує роль пружного підвісу, але оскільки на дні розташовуються датчики знімання і збудження, які збільшують жорсткість по осях їх розташування, то для забезпечення коливань резонатора по цих осях необхідно збільшити жорсткість частини дна між датчиками. Проте, між п'єзоелектродами розташовані отвори, тому порівнюємо жорсткості уздовж осі спиць і осі, що проходить через центр отвору. Жорсткість спиць, які утворюються між отворами, рівна:

$$C_{сп} = \frac{Eh^2}{12R_0^2} \quad (3)$$

Жорсткість дна уздовж осі що проходить через центри отворів діаметром D (рис.2), для круглих отворів рівна:

$$C_Z = \frac{Eh^2}{12(R_0 - D)^2} \quad (4)$$

Для того, щоб максимальні коливання збуджувалися уздовж осей, де розташовані п'єзодатчики, необхідно виконати умову:

$$C_{сп}/C_Z < 1. \quad (5)$$

Жорсткість п'єзодатчиків визначається як:

$$C_n = \frac{E_n b h_n}{12a^3}, \quad (6)$$

де b, a, h_n – ширина, довжина і товщина п'єзопластины, E_n – модуль Юнга п'єзопластины.

Сумарна жорсткість спиць і розташованою на ній п'єзопластины, при співвідношенні розмірів $a = R_0/2, h_n = h$, рівна:

$$C_{\Sigma} = \frac{Eh^3}{12R_0^2} \left(1 + \frac{8E_n b}{ER_0} \right) \quad (7)$$

Для виконання умови (5) вимагається, щоб $C_{\Sigma}/C_Z < 1$, або:

$$\left(1 - \frac{d}{R_0} \right)^2 \left(1 + \frac{8E_n b}{ER_0} \right) < 1 \quad (8)$$

Умова (8) виконується при $D \geq R_0/2$. Таким чином, якщо діаметр отвору буде більше половини радіусу циліндра, то деформація дна циліндра зосередиться на спицях і буде виміряна п'єзодатчиками.

Проте, у цієї конструкції є недоліки, які полягають, передусім, в тому, що коливання стінок циліндра передаються на його дно з коефіцієнтом передачі значно меншим одиниці. Це означає, що якщо амплітуда коливань обода рівна, наприклад, 1 мікрон, то амплітуда коливань спиць, розташованої на дні циліндра дорівнює 0.05 мікрон, тобто менше в 20 разів (коефіцієнт передачі дорівнює 1/20). В результаті цього чутливість і точність гіроскопа падає. Крім того, при дії зовнішньої вібрації уздовж осі чутливості гіроскопа, тобто перпендикулярно дну циліндра, на тонкі і вузькі спиці діє велике навантаження від важкого, більшого обода. У

результаті цього поперечна деформація тонкої спиці, до якої кріпиться електрод, створює значну перешкоду, амплітуда якій пропорційна зовнішньої вібрації.

П'єзодатчики можуть кріпитися по усій довжині спиці або тільки у верхній її частині, тільки в нижній її частині, а також поперемінно у верхній і нижній частинах спиць. На дні циліндра виконується вузол кріплення резонатора на основу у вигляді конусоподібної конструкції, що вивернута в середину чутливого елемента (рис.4).

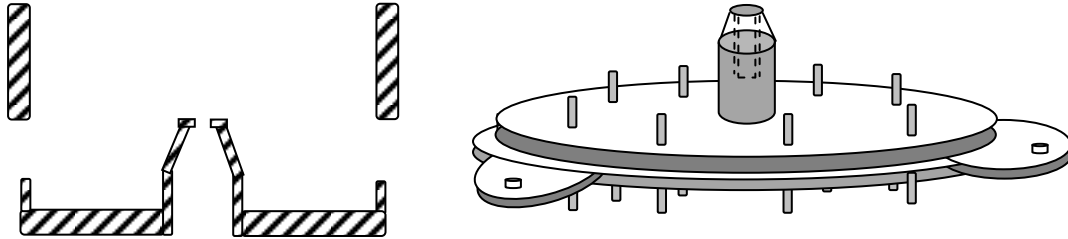


Рис. 4. Кріплення п'єзодатчиків

При дії зовнішніх збурень уздовж осі симетрії резонатора(уздовж осі чутливості гіроскопа), навантаження на спиці діє уздовж подовжньої її осі. Жорсткість спиці по подовжній осі значно більше, чим поперечна жорсткість спиць в конструкції, вказаній на рис.2 і рис. 3. Дійсно, припустимо для простоти, що спиця в нижній частині що утворює циліндра і спиця на дні циліндра мають однакову форму балки прямокутного поперечного перерізу, тоді поперечна жорсткість спиці (балки), K_x , рівна:

$$K_x = \frac{Ewh^2}{4l^3}; \quad (9)$$

де E – модуль Юнга матеріалу; w – ширина спиці; h – товщина спиці; l – довжина спиці.

Подовжня жорсткість спиці(балки), K_y , рівна:

$$K_y = \frac{Ewh}{l}; \quad (10)$$

Для діаметру резонатора 25мм розміри балки можуть приблизно дорівнювати наступним значенням: $w = 3\text{мм}$, $h = 0.4\text{мм}$, $l = 6\text{мм}$, тоді для подовжньої і поперечної жорсткостей отримаємо, відповідно: $K_y=0.15E$, $K_x=7.4 \times 10^{-5}E$. Таким чином, жорсткість спиці в конструкції, представлений на рис. 4 приблизно в $K_y/K_x \approx 2 \times 10^3$ разів більше, ніж жорсткість спиці в конструкції, представлений на рис. 2 і рис. 3. Значна різниця в жорсткостях спиць, конструкціях резонаторів, що розглядаються тут, призводить до значно менших (у 2000 разів) амплітуд вигинистих коливань спиць при дії зовнішніх механічних збурень в другій конструкції ЧЭ (рис. 4), чим у першої.

Приклад конструкції ЧЭ, що має значно нижчу вібро-ударо чутливість, у зборі приклад представлено на рис. 5.

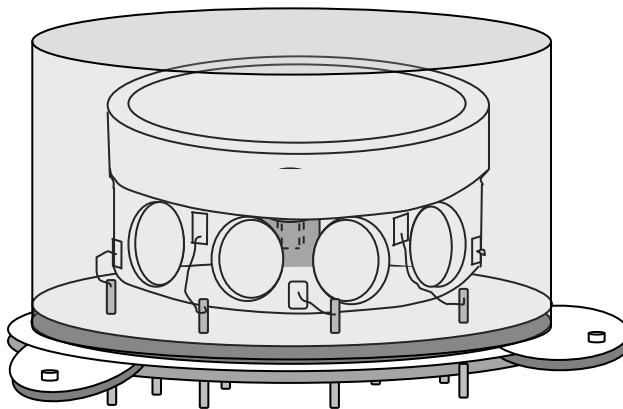


Рис. 5. ЧЭ з низькою вібро-ударо чутливістю

Висновки

Коріолісовий вібраційний гіроскоп, розроблений ПАТ «НВО «КЗА ім. Г.І. Петровського» при активній участі авторів статті, побудований на основі недорогого металевого резонатору, має високу точність та надійність і здатний успішно конкурувати з волоконо-оптичним гіроскопом.

1. Цірук В.Г. Системи наведення та стабілізації озброєння [Текст]: монографія / В.Г. Цірук, О.М. Безвесільна, В.П. Квасніков, В.В. Чіковані. – Київ: НАУ, 2014. – 176 с.
2. Безвесільна О.М. Інформаційно – комп’ютерні системи та технології. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин [Текст]: підручник з грифом МОНУ / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 320 с.
3. Безвесільна О.М. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем [Текст]: монографія / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Ю.О. Подчашинський. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 200 с.
4. Бондарук В.А., Возненко В.В., Маляров С.П., Пономаренко А.І., Цірук В.Г., Янкелевич Г.Є. Резонатор коріолісового вібраційного гіроскопа. Патент на винахід № 97938 від 26.03.2012.
5. Маляров С.П., Цірук В.Г., Ніколаєнко А.В. Цифровий коріолісівський вібраційний гіроскоп. Патент на винахід № 101747 від 25.04.2013.
6. Маляров С.П., Цірук В.Г., Ніколаєнко А.В. Чутливий елемент коріолісова вібраційного гіроскопа. Патент на винахід № 97783 від 12.03.2012.