

УДК 629.058: 623.465.34:531.383

Г.Ю. Строкач, студент гр. ПГ-01мн, к.т.н., Головач С.В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, АТ «Елміз»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ БАЛАНСУВАННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ КОРІОЛІСОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА ШЛЯХОМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕДУР ВИМІРЮВАННЯ

Анотація. У даній роботі розглянуто існуючий метод вимірювання параметрів дебалансу металевого резонатору чутливого елемента коріолісового вібраційного гіроскопа. Проаналізовано чинники які впливають на точність вимірювання та запропоновано метод автоматизації процесу вимірювання.

Ключові слова: коріолісовий вібраційний гіроскоп, резонатор, балансування, автоматизація.

ВСТУП

Коріолісові вібраційні гіроскопи (КВГ) – тип гіроскопічних приладів, принцип роботи яких заснований на інерційних властивостях пружних хвиль, які генеруються у певної форми оболонках робочої маси шляхом збудження коливань на їх резонансних частотах[1]. Дані прилади мають конкурентні співвідношення собівартості і точностних характеристик гіроскопічних приладів у якості датчиків кутової швидкості або кута повороту, а також високі показники надійності, що надає їм певні переваги при використанні у складі систем навігації та стабілізації. Чутливим елементом (ЧЕ) таких датчиків є збірка елементів збудження з резонатором, який, як відомо, на даний час виготовляється або з металу, або з кварцу. Різниця у використанні цих матеріалів для виготовлення резонатора полягає у кінцевих вартісних і точностних показниках ЧЕ і гіроскопа в цілому. Резонатори з кварцу, при певних умовах, можуть забезпечувати для гіроскопічного датчика одні з найкращих на даний момент вимірювальні характеристики, але через складність і невисоку технологічність виготовлення вимагають використання надзвичайно дорогого спеціалізованого обладнання та порівняно великих затрат часу. На відміну від кварцових резонаторів, металеві є значно простішими у виготовленні, також вимагають сучасного обладнання, проте більш стандартизованого, що робить їх технологічнішими, з нижчими, ніж у кварцових, проте досить високими вихідними характеристиками.

Найпоширенішою формою резонаторів для КВГ середнього та високого класу точності є тіла обертання, тобто циліндричні та сферичні [2-4] оболонки, проте існують гіроскопи, що побудовані на резонаторах з балочною формою [5]. При виготовленні ЧЕ для гіроскопів на базі таких резонаторів з'являється проблема розчеплення їх резонансної частоти внаслідок дебалансу мас, усунення якої вимагає операцій балансування. Відомі методи балансування, наприклад [3,6], передбачають ітераційний підхід до усунення дебалансу мас, що у свою чергу призводить до необхідності затрат часу на проведення вимірювань у кожній ітерації балансування. Автоматизація таких вимірювань є актуальною при виготовленні КВГ у промислових масштабах тому, що значно зменшує затрати часу, а отже і вартість виготовлення кожного датчика.

МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ ПО ЧЕТВЕРТІЙ ГАРМОНІЦІ ДЕБАЛАНСУ

Головною характеристикою, що визначає якість коріолісового вібраційного гіроскопа, є добротність – параметр коливальної системи, що визначає ширину резонансу та характеризує, у скільки разів запаси енергії у системи більше, ніж витрати енергії за один період коливань[2]. Через неточності виготовлення резонатори мають несиметричність розподілення мас в тілі обертання, що призводить до появи в них явища розщеплення частот. Розщеплення частот негативно впливає на кінцеві точності характеристики приладу і, як зазначено вище, виникає необхідність компенсувати негативний вплив розщеплення для чого виконується балансування.

Балансування – процес спрямований на зменшення впливу дебалансу мас у чутливому елементі до прийнятних значень шляхом зміни маси резонатора у відповідних його точках. Критеріями оцінки дії дебалансу мас є різночастотність, різнодобротність та кути осей максимальної і мінімальної добротності. Визначення перерахованих параметрів відбувається для резонатора у складі чутливого елемента, що представляє собою збірку резонатора з елементами збудження і знімання інформації. Елементи збудження і знімання можуть бути як п'єзокерамічними так і електростатичними [3, 7]. Передача та знімання сигналів на циліндричному резонаторі виконується через електроди на попарно з'єднані елементи. На рис.1 схематично зображено передачу сигналу збудження на елементи A1-A2 і знімання сигналу, що відповідає амплітуді коливань з елементів C1-C2.

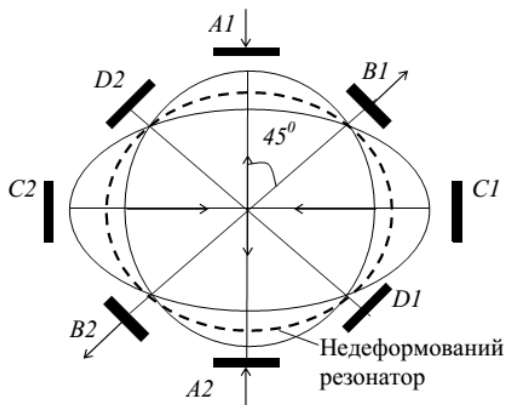


Рисунок 1 – Схематичне зображення елемента чутливого (збірки резонатора з елементами збудження і знімання)

Вимірювання параметрів дебалансу у процесі балансування потребує оперативного змінення режиму функціонування елементів зі збудження на знімання і навпаки, тому для таких потреб як правило розробляється спеціальний електронний блок перемикання. Пари електродів збудження і знімання у випадку, що розглядається (рис.1) розташовуються під кутом 45° відносно один одного. Сигнал збудження виробляється генератором частот, який генерує напругу з частотою, яка відповідає резонансній частоті резонатора. Вихідні напруги вимірюються за допомогою

мультиметрів, а їх фазність визначається осцилографом. В цілому весь алгоритм вимірювання параметрів дебалансу можна розподілити на наступні операції[3]:

- подача близької до резонансної частоти з генератора частот на пару елементів збудження A1-A2;
- знаходження першої (у даних умовах середовища) резонансної частоти F_{R1} за критерієм максимальної амплітуди U_B , виміряної на елементах B1-B2;

- фіксація фазності або протифазності сигналів на елементах А1-А2 та В1-В2;
- подання збуджуючого сигналу на пару елементів, які розташовані під 45° до попередньої пари збудження – елементи В1-В2 та вимірювання амплітуди і частоти коливань через елементи С1-С2;
- знаходження другої резонансної частоти F_{R2} за критерієм максимальної амплітуди U_C ;
- фіксація фазності або протифазності сигналів на елементах В1-В2 та С1-С2;
- знаходження частот F_{1q} та F_{2q} , які виникають при напругах $0,707 \cdot U_B$ та $0,707 \cdot U_C$.
- розрахунок на основі отриманих у попередніх операціях значень:
 - різночастотності ΔF ;
 - кутів осей максимальної добротності φ_{Q1} та φ_{Q2} відносно осі А1-А2;
 - добротності Q_1 та Q_2 ;
 - різнодобротність ΔQ .
 - розрахунок мас дебалансу та кутів вибірки мас.
- вибірка мас шляхом механічної обробки резонатора.

Отримання достовірних результатів вимірювання вищезазначених параметрів у виробництві досягаються за допомогою прецизійних приладів. Так, похибка задання частот повинна бути не більше $1 \cdot 10^{-3}$ Гц, а похибка вимірювання напруг – не більше $1 \cdot 10^{-4}$ В.

Перевагою описаного методу вимірювання параметрів чутливого елемента при балансуванні є висока точність вимірювання при наявності прецизійної апаратури. Недоліком такого методу є витрати часу на визначення параметрів, оскільки оператору необхідно виконувати значну кількість операцій регулювання пов'язаних зі знаходженням резонансних частот та амплітуд.

Сам процес балансування відбувається з послідовним зняттям невеликої маси в чотирьох точках резонатора й кількість операцій зняття мас може досягати 10-30 разів, а за деякими методами 100-200 разів. Причому, після кожної ітерації зняття мас необхідно проводити нове вимірювання параметрів дебалансу. Враховуючи, що вимірювання проводяться оператором, який виконує значну кількість операцій регулювання, можуть з'явитись похибки пов'язані з помилкою фіксації оператором значень, з яких вираховуються параметри. Також присутня похибка, що виникає через значний час вимірювання параметрів. Ця похибка характеризується тим, що у проміжку часу між фіксацією першої та другої резонансної частоти, перша частота може змінити своє значення через зміну температури навколишнього середовища й відпуску металу після механічних впливів. Описана похибка наявна також при вимірюваннях для визначення добротності.

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗГЛЯНУТОГО МЕТОДУ БАЛАНСУВАННЯ

У розглянутому вище методі балансування найбільш трудоемким з точки

зору витрат часу та кількості дій оператора є, без сумніву, пошук резонансних частот, та частот на рівні 0,707 від амплітуд U_B та U_C . Як показує практика, оператору в середньому потрібно витратити близько 10 хвилин для визначення даних параметрів і внесення їх у електронну таблицю. З метою оптимізації даної операції було виконано розробку автоматизованої системи генерації частоти та знімання вихідної амплітуди.

Автоматизована система генерації частоти та знімання вихідної амплітуди для балансування передбачає той же алгоритм дій, який описано у методі балансування ЧЕ по четвертій гармоніці дебалансу, проте за задання вхідного збурення та його зчитування відповідає електронний блок, основними елементами якого є сигнальний мікропроцесор, ЦАП, АЦП та операційні підсилювачі. Сигнальний мікропроцесор формує цифровий сигнал гармонічних коливань з необхідною амплітудою. Даний сигнал подається на ЦАП та через підсилювач безпосередньо на елементи збудження коливань резонатора. АЦП через підсилювач отримує сигнал з елементів знімання на резонаторі та у вигляді цифрового сигналу передає його у сигнальний мікропроцесор, який у свою чергу через інтерфейс обміну даними RS-232 передає дані у операційну систему персонального комп'ютера через спеціально розроблене програмне забезпечення оператора (ПЗО). За допомогою даного ПЗО можливо також конфігурувати роботу описаного електронного пристрою таким чином, що оператору необхідно лише задати приблизне значення резонансної частоти ЧЕ, діапазон вимірювання, крок зміни частоти збудження, час вимірювання на кожному кроці, а також вказати обрати пари елементів ЧЕ для збудження і знімання. Загальний час вимірювання такої системи у одній ітерації балансування визначатиметься відповідно як добуток кількості точок частоти збудження та часу вимірювання на одній точці. Автоматична фіксація результатів на кожному кроці дає змогу будувати АЧХ по отриманим даним на елементах збудження В1-В2 та С1-С2 (рис.2). У середньому час визначення резонансних частот, частот на рівні 0,707 від амплітуд U_B та U_C , а також самих амплітуд U_B та U_C склав приблизно 1 хв. При цьому на основі таких отриманих даних також автоматично розраховувались такі похідні параметри як Q_1 , Q_2 , ΔQ , ΔF , φ_{Q1} , φ_{Q2} та, після визначення за допомогою осцилографа фазності або протифазності, параметри вибірки мас дебалансу якими у подальшому керується оператор для механічного втручання у конструкцію резонатора.

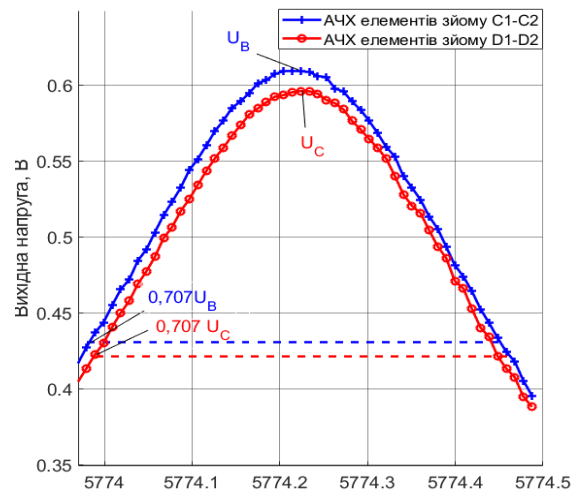


Рис.2 Графік зафіксованих значень АЧХ

ВИСНОВОК

У роботі розглянуто метод вимірювання параметрів дебалансу при балансуванні ЧЕ на основі металевого циліндричного резонатора по четвертій

гармоніці дебалансу. Зосереджено увагу на можливості оптимізації часу вимірювання даних параметрів, зокрема для запобігання виникнення похибок у процесі вимірювань, що залежать від часу їх виконання. Запроновано автоматизацію вимірювань шляхом розробки спеціальної автоматизованої системи генерації частоти та знімання вихідної амплітуди для балансування. При даному автоматизованому способі вимірювань параметрів дебалансу можливість виникнення похибок через неточність чи недостовірність фіксації параметрів ЧЕ оператором звелась до мінімуму. При цьому слід зазначити, що залишилась необхідність визначення фазності або протифазності за допомогою фіксації відповідних сигналів осцилографом. Розробка автоматизації вимірювання даного параметра планується у подальших роботах. В цілому описаний у даній роботі метод оптимізації операцій балансування продемонстрував високу ефективність та зменшення часу вимірювань при кожній ітерації балансування приблизно у 10 разів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] D.D. Lynch, "Coriolis vibratory gyros", in Proc. Gyro Technology Symposium, 21-23 September, 1998, Stuttgart, Germany, pp. 3.1-3.14.
- [2] Zhinan Qiu, Tianliang Qu. Optical and Electrical Method Characterizing the Dynamic Behavior of the Fused Silica Cylindrical Resonator. Sensors 2019, 19, 2928; doi:10.3390/s19132928.
- [3] Петренко, О. (2020). Удосконалення методів підвищення точності вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором. (Дис. канд. техн. наук). Національний Технічний Університет України "Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського", Київ.
- [4] Распопов В.Я., Волочихин И.А., Волочихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В, Матвеев В.В. Волновая твердотельный гироскоп с металлическим резонатором/ Аод ред. В.Я. Распопова. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.
- [5] Leger P. Quarason™ – A New Low-Cost Vibrating Gyroscope // Proceedings of 3rd Saint Petersburg International Conference of Integrated Navigation Systems. – 1996. - part 1. - pp. 143-149.
- [6] Basarab, M.A., Lunin, B.S., Matveev, V.A. et al. Balancing of hemispherical resonator gyros by chemical etching. Gyroscopy Navig. 6, 218–223 (2015).
- [7] Characterization of the Bell-Shaped Vibratory Angular Rate Gyro / N. Liu [et al.]. // Sensors. 2013. № 13. P. 10123 – 10150. DOI: 10.3390/s130810123.

Наук. керівник – к.т.н. Головач С.В.