

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та
навігаційних систем

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ
«__» _____ 2024 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології та
системи навігації і керування»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему «Коріолісовий вібраційний гіроскоп»

Виконав:
студент IV курсу, групи ПГ-01
Мульганов Михайло Юрійович
Керівник:
Професор, д.т.н., професор
Аврутов Вадим Вікторович
Рецензент:
Доцент, к.т.н., доцент
Клочко Тетяна Реджинальдівна

Засвідчую, що у цій пояснювальній записці немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма – «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи навігації і керування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Надія Бурау

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Мульганову Михайлу

1. Тема роботи **«Коріолісовий вібраційний гіроскоп»**, керівник роботи Аврутов Вадим Вікторович, докт. тех. наук, професор, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. **Термін подання** студентом роботи: 05.06.2024 р.

3. **Вихідні дані до роботи:** Прийняти наступні параметри гіроскопу: матеріал резонатора - сплав С300 (сталь: $\rho=7,9 \cdot 10^3$ кг/м³; $E=16,8 \cdot 10^{10}$ Н/м²); $h=1$ мм – товщина стінки резонатора; $R=20$ мм – радіус резонатора вздовж середньої лінії; діапазон вимірювання $\pm 2000^\circ/\text{с}$; смуга пропускання 50 Гц; нестабільність зміщення нуля не більше $0,6^\circ/\text{год}$; нестабільність масштабного коефіцієнта – 0,001; час запуску 3 сек; час виходу на режим 6 сек; номінальне значення масштабного коефіцієнта – $1 \cdot 10^{-6}^\circ/\text{с}$; споживана потужність не більше 4 Вт; діапазон робочої температури - $40..+85^\circ\text{C}$; габарити $\varnothing 32 \times 29,5 \text{ мм}$; маса приладу – не більше 0,25 кг.

4. Зміст роботи:

4.1. Інформаційно-аналітичний огляд сучасного стану коріолісових вібраційних гіроскопів (КВГ).

4.2. Розрахувати власні частоти резонатору КВГ.

4.3. Оптимізувати розташування п'єзокераміки на резонаторі КВГ.

4.4. Провести моделювання роботи приладу.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

5.1. Принципова схема роботи КВГ (1хА1);

5.2. Креслення збірки чутливого елемента КВГ (1хА1);

5.3. Креслення резонаторів різних форм (4хА1);

Презентація в форматі Microsoft PowerPoint (*.ppt) або Adobe Acrobat (*.pdf).

6. Дата видачі завдання: 26.04.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Інформаційно-аналітичний огляд сучасного стану КВГ.	10.05.2024	
2.	Розрахунок резонатору КВГ; Загальне креслення КВГ.	29.04.2024	
3.	Оптимізація розташування п'єзокераміки на резонаторі КВГ.	25.05.2024	
4.	Моделювання роботи приладу. Проведення випробувань. Креслення резонаторів різних форм.	01.06.2024	

Студент

Михайло Мультанов

Керівник роботи

Вадим Аврутов

Анотація

Дипломний проєкт освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за напрямом підготовки 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи навігації і керування» на тему «Коріолісовий вібраційний гіроскоп».

Дипломний проєкт складається з пояснювальної записки на 59 сторінках і креслень на 5 аркушах А1 та на одному аркуші А3. Пояснювальна записка містить 39 рисунків, 15 таблиць та 21 джерело літератури.

У першому розділі проведено інформаційно-аналітичний огляд розвитку КВГ. Визначено сфери застосування КВГ. У другому розділі розглянуто принцип роботи КВГ, показані основні моди коливань резонатора КВГ. Також аналітично знайдена резонансна частота резонатора КВГ та за допомоги програмного забезпечення MatLAB® отримано графічні залежності резонансної частоти резонатора КВГ від мод коливань для різних геометричних параметрів резонатора. Експериментальна перевірка підтвердила результати аналітичних розрахунків. У третьому розділі розглянуто основні характеристики п'єзокерамічних елементів збудження первинних коливань резонатора КВГ. Показані основні результати комп'ютерного моделювання резонатора та п'єзокераміки за допомогою програмного забезпечення ANSYS®. У четвертому розділі проведена оптимізація розташування п'єзокераміки на резонаторі КВГ. Висвітлені проблеми розвитку КВГ та запропоновано напрями подальших досліджень.

ABSTRACT

Diploma project of the educational and qualification level "bachelor" according to the field of training 151 - "Automation and computer-integrated technologies" according to the educational and professional program "Computer-integrated technologies and navigation and control systems" on the topic "Coriolis vibration gyroscope".

The diploma project contains an explanatory note on 59 pages and graphic materials on 4 sheets of A1 and 1 sheet of A3. The explanatory note contains 39 figures, 15 tables and 21 sources were used.

In the first section, an informational and analytical review of the development of CVG was carried out. The spheres of application of CVG are determined. In the second chapter, the principle of operation of the CVG was considered, the main modes of oscillations of the CVG resonator were shown. Also, the resonant frequency of the CVG was found analytically using the MatLAB® software. Experimental verification of calculations was carried out. In the third section, the main characteristics of piezoceramic elements for the excitation of primary oscillations of the CVG resonator were considered. the main results of computer modeling of the resonator and piezoceramics using the ANSYS® software are shown. In the fourth chapter, the main actions for optimizing the resonator assembly were carried out.

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Сучасний стан КВГ у світі	9
1.1 Сучасні датчики кутової швидкості	9
1.2 Застосування КВГ	13
1.3 Сучасні КВГ у світі	14
Розділ 2. Розрахунок резонатора КВГ	23
2.1 Визначення моди коливань резонатора	23
2.2 Знаходження резонансної частоти	30
2.3 Експериментальне визначення власних частот резонатора	31
2.4 Аналітичне знаходження частот вільних коливань.....	33
циліндричного резонатора КВГ	33
2.5 Види збудження первинних коливань	37
Розділ 3. Моделювання окремих частини збірки резонатора.....	38
3.1 Огляд п'єзокераміки	38
3.2 Моделювання різних форм резонатора.....	40
3.3 Моделювання збірки резонатора	44
Розділ 4. Оптимізація розташування п'єзокераміки.....	48
4.1 Оптимізація першої форми резонатора	48
4.2 Оптимізація другої форми резонатора.....	51
4.3. Проблеми та подальші дослідження КВГ	54
Висновки	55
Література	57

Перелік умовних позначень

КВГ – коріолісовий вібраційний гіроскоп;

ТХГ – твердотільний хвильовий гіроскоп;

КЛГ – кільцевий лазерний гіроскоп;

ВОГ – волоконо-оптичний гіроскоп;

МЕМС – мікроелектромеханічні системи;

ДНГ – динамічно налаштований гіроскоп;

АНРС – Attitude & Heading Reference System;

ДКШ – датчик кутової швидкості;

Вступ

Коріолісові вібраційні гіроскопи (КВГ) належать до найбільш сучасних гіроскопів. Завдяки своїм перевагам їх застосування досить широке. КВГ застосовуються у різних галузях промисловості, включаючи авіацію, космічні технології, автомобільну промисловість.

Головна ідея вібраційних гіроскопів полягає в тому, щоб замінити ротор, що постійно обертається, вібруючою структурою, і скористатися коріолісовим ефектом, що викликає вторинний рух, який пов'язаний із зовнішньою кутовою швидкістю. Цей тип датчиків кутової швидкості зазвичай називається КВГ [1].

Однією з основних переваг КВГ є відсутність рухомих частин на відміну від класичних гіроскопів. Завдяки цьому підвищується його надійність та зменшується потреба в обслуговуванні.

Використання мікроелектромеханічних систем (МЕМС) в інерціальних навігаційних системах призвело до революційних змін. МЕМС відрізняються своєю мініатюрністю, низьким енергоспоживанням та високою надійністю. Вони створюються шляхом інтеграції мікромеханічних резонаторів і електронних компонентів на одному кремнієвому чипі, використовуючи такі технології виробництва, як фотолітографія та травлення [2].

Завдяки компактним розмірам і високій точності, МЕМС широко застосовуються у сучасних портативних пристроях, таких як смартфони, планшети, дрони. Крім того, вони використовуються в автомобільних системах стабілізації, медичних приладах і навіть у військовій техніці. Розробка та вдосконалення МЕМС триває, що відкриває нові можливості для їх використання у різноманітних інноваційних галузях.

Основною метою роботи був розрахунок елементів КВГ. Об'єктом досліджень виступає металевий циліндричний резонатор КВГ та п'єзокерамічні електроди у жорстко з'єднаній конструкції.

Розділ 1. Сучасний стан КВГ у світі

1.1 Сучасні датчики кутової швидкості

Гіроскопи залишаються ключовими компонентами сучасних технологій інерціальної навігації, стабілізації та вимірювань. Розвиток гіроскопії охоплює широкий спектр різноманітних типів гіроскопів, кожен з яких має свої унікальні властивості та застосування. Виходячи з цього бачимо на сьогоднішній день використання великої кількості різних типів гіроскопів. У кожного є своя певна сфера застосування. На рис. 1. показано сучасний стан гіроскопії [3].

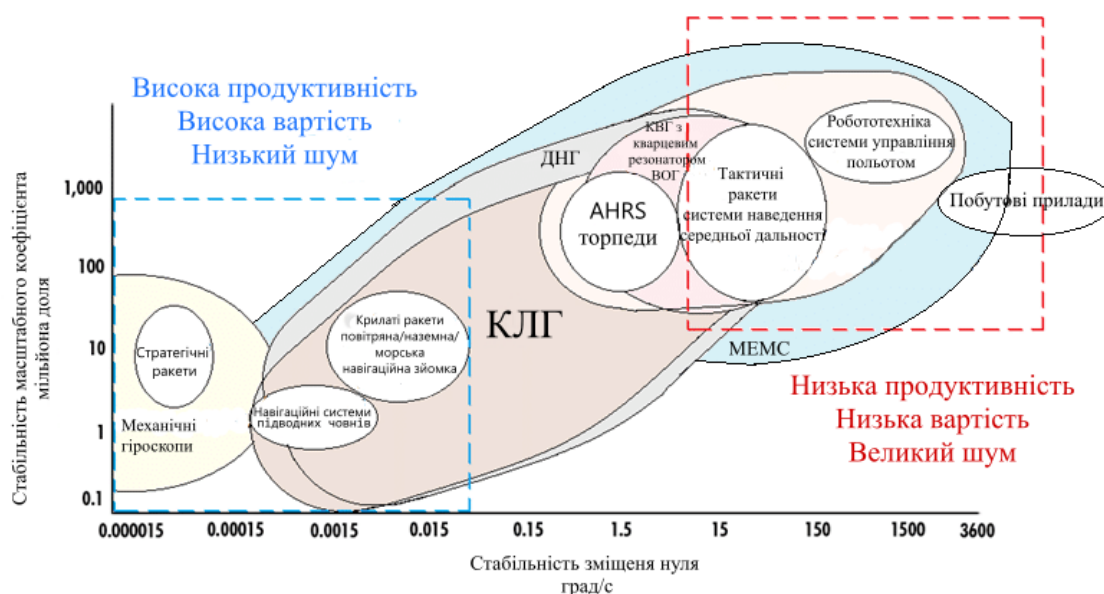


Рис. 1. Сучасні галузі застосування різних типів гіроскопів

Механічний гіроскоп по суті складається з обертової маси, яка обертається навколо своєї осі. в зокрема, коли маса обертається навколо своєї осі, вона прагне залишатися паралельною собі та протистояти будь-якому спроба змінити його орієнтацію. Цей механізм був винайдений у 1852 році фізиком Леоном Фуко під час вивчення обертання Землі. Якщо гіроскоп встановлений на підвісах, які дозволяють масі вільно орієнтуватися в трьох напрямках простору, його вісь обертання залишатиметься незмінно орієнтованою напрямком, навіть якщо він змінює напрямок [4].

Волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) використовують інтерферометричні ефекти у волоконно-оптичних кабелях для визначення кутової швидкості. ВОГ характеризуються високою точністю, надійністю та відсутністю рухомих частин.

Кільцеві лазерні гіроскопи (КЛГ) використовують кільцеві лазери для визначення кутових переміщень через ефект Саньяка. КЛГ мають високу точність і стабільність, що робить їх популярними у високоточних навігаційних системах.

КВГ займають важливе місце у сучасних інерціальних навігаційних системах завдяки своїй високій точності, надійності та адаптивності до різних умов експлуатації. Станом на сьогодні, КВГ є невід'ємною частиною багатьох технологічних систем, від високоточних навігаційних приладів до побутових електронних пристроїв.

КВГ поділяються на декілька типів. Один з них це гіроскопи виготовленні по технологіям МЕМС. Вони компактні, енергоефективні та відносно недорогі у виробництві. Наступний тип КВГ – це твердотільні хвильові гіроскопи (ТХГ). Вони має суттєво більшу точність у порівнянні з МЕМС гіроскопами. Також ТХГ мають більш стабільний дрейф нуля.

В свою чергу ТХГ виготовляють з різними резонаторами. Є два основних матеріали для виготовлення резонатору це метал та кварц. На рис. 2. зображені резонатори з кварцу [5]. Такі резонатори мають дуже велику добротність. Із недоліків це те що вони мають великий коефіцієнт розширення з ростом температури.



Рис. 2. Кварцевий резонатор [5]

Наступний тип резонатора це металевий. На рис. 3 зображено металевий резонатор [6]. Такі резонатори достатньо прості з точки зору виготовлення та більш де-

шеві у виробництві. Їх виробляють зі спеціального сплаву. Сплав, з якого має виготовлятися резонатор має задовольняти наступним властивостям:

- висока стабільність модуля пружності;
- мінімальний температурний коефіцієнт частоти;
- мінімальний температурний коефіцієнт лінійного розширення;

Для вибору оптимального матеріалу для резонатора було обрано наступні марки сплавів: 21НКМТ, 03Н18К9М5Т, С300 та 44НХТЮ [7]. Ці сплави виділяються великим вмістом нікелю, молібдену та кобальту. Саме ці домішки надають нам саме ті властивості які потрібні.

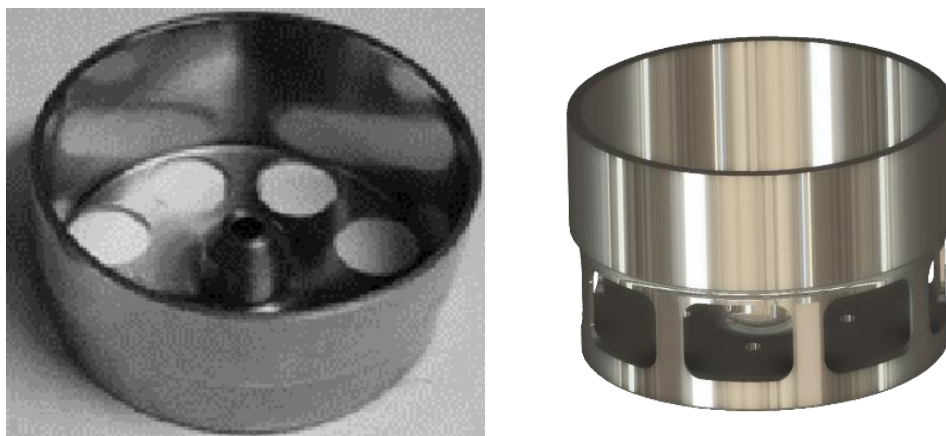


Рис. 3. Металевий резонатор

Важливо зазначити що резонатори також відрізняються за формою. Основі форми резонатора представлені на рис. 4.

Основою роботи КВГ є постійне збудження коливань у твердому тілі – резонаторі. Залежно від характеру мод вібрації резонатора, ТВГ поділяються на два типи: 1-ий тип – моди вібрацій різні (камертонний, балочний резонатор); 2-ий тип – моди вібрацій ідентичні (напівсферичні, циліндричні оболонки) [6].

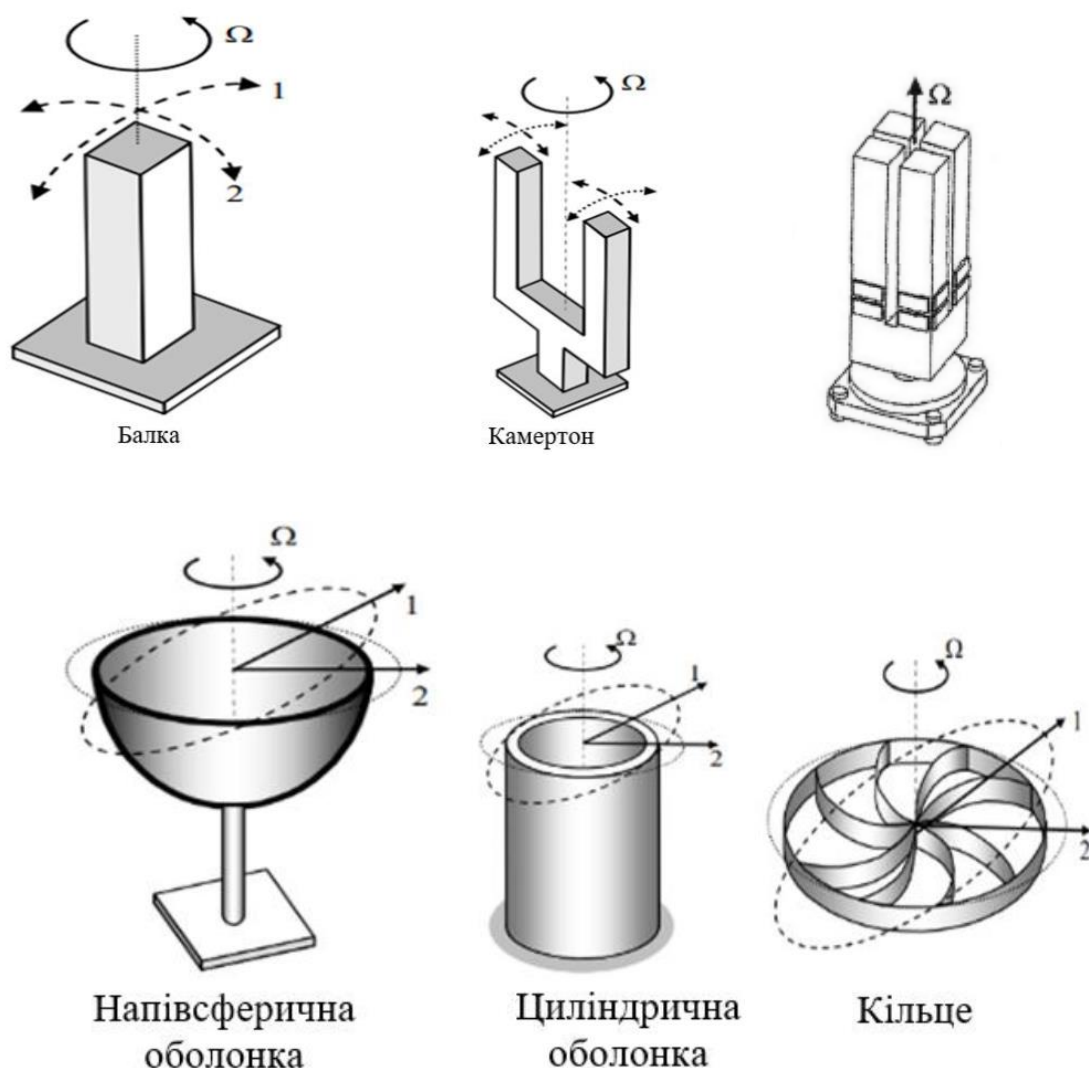


Рис. 4. Найбільш розповсюджені форми резонаторів

Різниця між чутливими елементами більшості сучасних КВГ лежить, головним чином, в конструкціях власне мас і пружних підвісів, а не в принципі роботи або математичної моделі їх руху. Зазначені особливості дозволяють класифікувати чутливі елементи за природою первинних і вторинних рухів, типом або кількістю інерціальних мас [1].

Останніми роками значний прогрес був досягнутий у покращенні точності та надійності КВГ з циліндричним резонатором. Основні зусилля вчених і інженерів спрямовані на вдосконалення матеріалів, з яких виготовляються резонатори, та оптимізацію їх геометрії. Характеристики точності ТХГ сильно варіюються, оскільки вони безпосередньо пов'язані зі способом збудження поперечних пружних хвиль

всередині резонатора; тому вони залежать в основному від особливостей використаної електроніки. ТХГ за своїми властивостями може конкурувати з КЛГ, а його випадковий відхід за кутом, щонайменше, такий же, як у волокно-оптичного гіроскопу [8]. Тенденція розвитку найсучасніших гіроскопічних технологій на світовому ринку використовує стратегію зниження вартості гіроскопів, що в свою чергу призводить до використання КВГ. Собівартість даних приладів нижче, ніж у конкуруючих приладів з такою ж точністю за рахунок простоти конструкції, мінімальної кількості компонентів чутливого елементу (ЧЕ), що спрощує збірку. Вибір матеріалу, з якого буде створюватися майбутній гіроскоп залежить від вимог до чутливого елементу, умов експлуатації самого приладу і фінансових можливостей виробника та замовника. Вібруючі гіроскопи з металевими резонаторами в порівнянні з гіроскопами із кварцовими резонаторами мають меншу добротність і, як результат, меншу точність. Однак, складність і не технологічність виготовлення резонаторів з кварцового скла для досягнення великої добротності, а також тривала і дорога процедура балансування мас робить кварцевий резонатор значно дорожче його металевого аналога. Висока чутливість та точність КВГ з металевим резонатором може бути досягнена за рахунок зростання віброуючої маси [7].

1.2 Застосування КВГ

КВГ використовуються в різних високотехнологічних областях завдяки їх високій точності, надійності та здатності працювати в екстремальних умовах. Вони використовують вібраційні резонатори для вимірювання кутової швидкості на основі ефекту Коріоліса, що робить їх привабливими для багатьох застосувань.

Авіація та космічні технології: навігаційні системи літаків: КВГ використовуються для забезпечення точної інерціальної навігації, що дозволяє визначати місцезнаходження літака навіть за відсутності сигналів GPS. Вони також допомагають в автоматичному керуванні польотом і стабілізації літальних апаратів.

Космічні апарати: У космічних умовах, де надійність і стабільність є критично важливими, КВГ забезпечують точні вимірювання кутових швидкостей, необхідні

для орієнтації та стабілізації космічних апаратів, таких як супутники та космічні станції.

Системи керування озброєнням: КВГ використовуються у системах наведення та стабілізації зброї для підвищення точності стрільби. Вони дозволяють точно вимірювати рухи і коригувати напрямок пострілу в реальному часі.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА): у військових дронах КВГ допомагають забезпечити стабільність польоту та точне виконання маневрів, що є важливим для розвідувальних місій та бойових операцій.

Системи стабілізації руху: у сучасних автомобілях КВГ використовуються в системах контролю стабільності для виявлення і корекції ковзання та зберігання стійкості автомобіля на дорозі.

Автономні транспортні засоби: у безпілотних автомобілях КВГ допомагають забезпечити точну навігацію і стабілізацію транспортного засобу, що є критично важливим для безпечного та ефективного руху на дорогах.

Роботи та автоматизація: у роботизованих системах КВГ забезпечують точне визначення положення і стабілізацію рухів, що важливо для виконання складних маніпуляцій та точного контролю у промислових процесах.

Геодезичні прилади: у високоточних вимірювальних інструментах, таких як лазерні теодоліти та інтерферометри, КВГ використовуються для забезпечення стабільності і точності вимірювань у різних умовах експлуатації.

КВГ є важливим компонентом багатьох сучасних технологічних систем завдяки їх високій точності, надійності і здатності працювати у важких умовах.

1.3 Сучасні КВГ у світі

Сучасні КВГ розвиваються дуже швидко. Основний напрямок розвитку, залишається, підвищення точності. На сьогоднішній день існує декілька компаній які виготовляють КВГ. Першою такою компанією є Northrop Grumman (США).

Гіроскоп Space HRG™ із напівсферичним резонатором у складі Scalable SIRU™ складається з трьох простих механічно оброблених кварцових частин: зов-

нішньої оболонки, високоякісного вібраційного напівсферичного резонатора і внутрішньої оболонки. Кварцова конструкція від природи стабільна, несприйнятлива до старіння і природним чином захищена від радіації. Працюючи у повністю вакуумному герметично закритому корпусі, є ідеальним гіроскопом для космічних застосувань [9]. На рис. 5 показаний Space HRG™ та в табл. 1 приведені його характеристики.



Рис. 5. KBG Space HRG™

Таблиця 1. Характеристики Scalable SIRU™

Вихідний інтерфейс	RS-422
Діапазон робочих температур, °C	-55...+85
Нестабільність нуля у запуску, °/год	0,05
Випадковий дрейф кута (у нормальних умовах), °/√год	0,00015
Напруга живлення, В (DC)	28 або 70
Потужність споживання, Вт	43
Габарити, мм	289x180x149
Вага, кг	7,1

Наступною є компанія Safran Electronics & Defense з Франції. SpaceNaute® (рис. 6) [10] розроблено для забезпечення повністю автономної та точної навігації, наведення та контролю в космосі у всіх видах місій, включаючи розміщення супутника на надсинхронних пересадочних орбітах. Також SpaceNaute® дозволяє виконувати подальші складні та довготривалі місії індикаторів двигуна, наприклад, для до-

слідження глибокого космосу. Вимоги до точності SpaceNaute® залежать від потреби пускової установки з точки зору орбітальних параметрів, орієнтацій, швидкостей і позицій [10]. В табл. 2 [10] показані основні характеристики навігаційної системи SpaceNaute®.

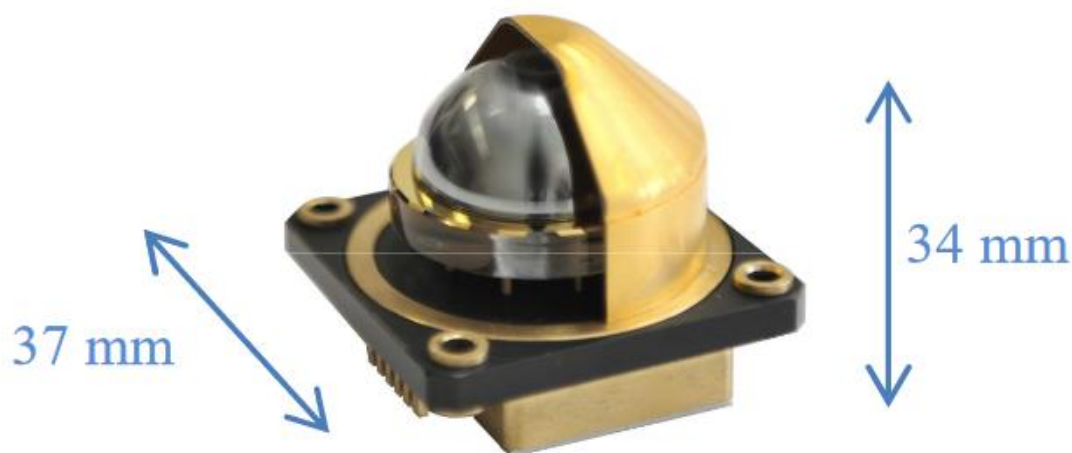


Рис. 6. КВГ для навігаційної системи SpaceNaute®

Таблиця 2. Характеристики КВГ з SpaceNaute®

Діапазон робочих температур, °C	-40...+70
Смуга пропускання, Гц	10
Нестабільність нуля у запуску, °/год	0,005
Випадковий дрейф кута (у нормальних умовах), °/√год	0,0002
Напруга живлення, В (DC)	55
Потужність споживання, Вт	18
Об'єм, л	7
Вага, кг	7

Далі йде компанія InnaLabs® (Ірландія). Вона має декілька сімейств а саме: A-Series, E-Series, F-Series, U-Series. На рис. 7 [11] показано U-Series та на табл. 3 [11] показані його характеристики.

Ці гіроскопи можуть мати індивідуальні монтажні рішення, а завдяки їх високому динамічному діапазону, низькому рівню шуму та високій середній напруцюва-

ності на відмову (MTBF), в поєднанні з малим розміром, ця серія гіроскопів є ідеальним вибором для стабілізації платформ [11].



Рис. 7. КВГ U-Series від компанії InnaLabs®

Таблиця 3. Характеристики КВГ U-Series

Цифровий вихідний сигнал	кутова швидкість, °/с
Вихідний інтерфейс	RS-422
Діапазон робочих температур, °C	-40...+70
Смуга пропускання, Гц	300
Нестабільність нуля у запуску, °/год	0,22
Випадковий дрейф кута (у нормальних умовах), °/√год	0,01
Час готовності до видачі інформації, с	1
Напруга живлення, В (DC)	22..32
Потужність споживання, Вт	3,5
Габарити, мм	68x107x107
Вага, кг	1,1

InnaLabs® E-Series Gyroscopes (рис. 8) - це високопродуктивні, мініатюрні, міцні та надійні коріолісові гіроскопи, що забезпечують вимірювання інерційної кутової швидкості обертання навколо двох осей. Основною технологією, що використовується в моделі GI-CVG-E22XXD, є запатентована та перевірена технологія вібраційних гіроскопів (CVG) від InnaLabs®, яка за своєю природою стабільна, не підда-

ється ефектам старіння, природньо стійка до вібрацій і ударів та споживає мало енергії [11]. Основні характеристики представлені в табл. 4 [11].



Рис. 8. КВГ E-Series від компанії InnaLabs®

Таблиця 4. Характеристики КВГ E-Series

Цифровий вихідний сигнал	кутова швидкість, °/с
Вихідний інтерфейс	RS-422
Діапазон вимірювання кутових швидкостей, °/с	±300
Діапазон робочих температур, °C	-40...+85
Смуга пропускання, Гц	300
Нестабільність нуля у запуску, °/год	0,3
Випадковий дрейф кута (у нормальних умовах), °/√год	0,015
Час готовності до видачі інформації, с	3
Напруга живлення, В (DC)	5
Габарити, мм	Ø65×90

Гіроскопи F-Series від InnaLabs® - це високопродуктивні, мініатюрні, міцні та надійні коріолісові гіроскопи, що забезпечують вимірювання кутової швидкості обертання навколо однієї опорної осі. Гіроскопи серії F мають безпрецедентне співвідношення розміру ($\leq 100 \text{ см}^3$) до кутового випадкового блукання ($\leq 0,015^\circ/\sqrt{\text{год}}$), на яке так довго чекали на ринку стабілізації. Представлений на рис. 9. Характеристики показані в табл. 5 [11].



Рис. 9. КВГ F-Series від компанії InnaLabs®

Таблиця 5. Характеристики КВГ F-Series

Цифровий вихідний сигнал	кутова швидкість, °/с
Вихідний інтерфейс	RS-422
Діапазон вимірювання кутових швидкостей, °/с	±300
Діапазон робочих температур, °C	-40...+85
Смуга пропускання, Гц	300
Нестабільність нуля у запуску, °/год	0,2
Випадковий дрейф кута (у нормальних умовах), °/√год	0,015
Час готовності до видачі інформації, с	3
Габарити, мм	Ø42×53

A-Series від компанії InnaLabs® (рис. 10) - це 3-осьові КВГ гіроскопи з цифровим виходом, що дозволяє користувачеві точно вимірювати три ортогональні швидкості обертання (крен, тангаж та рискання). Ці гіроскопи підходять для багатьох застосувань, які вимагають тактичної точності, дуже низького рівня шуму та висока надійність у компактному дизайні з низьким енергоспоживанням. Характеристики представлені в табл.6.



Рис. 10. KBГ A-Series від компанії InnaLabs®

Таблиця 6. Характеристики KBГ A-Series

Цифровий вихідний сигнал	кутова швидкість, °/с
Вихідний інтерфейс	RS-422
Діапазон вимірювання кутових швидкостей, °/с	±160
Смуга пропускання, Гц	300
Нестабільність нуля у запуску, °/год	0,1
Випадковий дрейф кута (у нормальних умовах), °/√год	0,015
Час готовності до видачі інформації, с	1
Напруга живлення, В (DC)	28
Потужність споживання, Вт	6
Габарити, мм	107x107x 68
Вага, кг	1,3

Вітчизняна компанія АТ «Елміз» пропонує декілька KBГ з циліндричним металевим резонатором. А саме такі: ТВГ-43 та ТВГ-25. Твердотільний вібраційний гіроскоп ТВГ-43 (рис. 11) [12] призначений для систем з підвищеними вимогами до точності вимірювань кутових орієнтацій. Чутливість даних датчиків дозволяє виконувати з їх допомогою вимірювання проекцій кутової швидкості Землі, а низький рівень випадкового дрейфу кута здатен забезпечити довготривале управління рухомими об'єктами в автономному режимі [12]. В табл. 7 показання характеристики ТВГ-43.



Рис. 11. ТВГ-43 від АТ «Елміз»

Таблиця 7. Характеристики ТВГ-43

Цифровий вихідний сигнал	кутова швидкість, °/с
Вихідний інтерфейс	RS-485
Діапазон вимірювання кутових швидкостей, °/с	±300
Діапазон робочих температур, °C	-40...+70
Смуга пропускання, Гц	100
Нестабільність нуля у запуску, °/год	0,05
Випадковий дрейф кута (у нормальних умовах), °/√год	0,003
Час готовності до видачі інформації, с	5
Час виходу на режим забезпечення точності готовності, с	30
Напруга живлення, В (DC)	22..32
Потужність споживання, Вт	3,5
Габарити, мм	Ø74×53
Вага, кг	0,35

Наступний гіроскоп називається ТВГ-25 (рис. 12). Він на сьогодні розглядається як один з перспективних класів гіроскопів, в тому числі за критеріями стійкості до механічних впливів та «розмір-маса-енергоспоживання-вартість» [12]. Його характеристики показані в табл. 8.

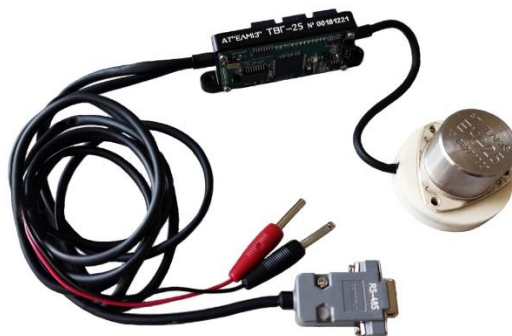


Рис. 12. ТВГ-25 від АТ «Елміз»

Таблиця 8. Характеристики ТВГ-25

Цифровий вихідний сигнал	кутова швидкість, $^{\circ}/\text{с}$
Вихідний інтерфейс	RS-485
Діапазон вимірювання кутових швидкостей, $^{\circ}/\text{с}$	± 700
Діапазон робочих температур, $^{\circ}\text{C}$	$-40 \dots +70$
Смуга пропускання, Гц	100
Нестабільність нуля у запуску, $^{\circ}/\text{год}$	0,5
Випадковий дрейф кута (у нормальних умовах), $^{\circ}/\sqrt{\text{год}}$	0,03
Час готовності до видачі інформації, с	5
Час виходу на режим забезпечення точностної готовності, с	30
Напруга живлення, В (DC)	22..32
Потужність споживання, Вт	3,5
Габарити, мм	$\varnothing 42 \times 53$
Вага, кг	0,28

Отже, останнім часом стрімкий розвиток КВГ відбувається в найбільш розвинутих країнах світу.

Розділ 2. Розрахунок резонатора КВГ

2.1 Визначення моди коливань резонатора

Моди коливань — це характерні форми руху, які виникають у вібраційній системі при її збудженні. У кожній моді коливань система коливається з певною власною частотою і має специфічний розподіл амплітуд і фаз у різних точках. У механічних системах, таких як струнні музичні інструменти або мембрани, моди коливань визначаються геометрією, матеріалами та граничними умовами системи. Для КВГ, які використовують резонатори, моди коливань є ключовими для їхньої роботи, оскільки саме через ці моди відбувається передача і вимірювання кутових швидкостей.

Типи мод коливань

Моди коливань можуть бути поділені на кілька типів залежно від характеру руху в системі. Основні типи включають:

- Поступальні моди: коливання відбуваються вздовж однієї або декількох координатних осей без обертання.
- Обертальні моди: коливання відбуваються навколо певної осі, що часто використовується у гіроскопах.
- Згинальні моди: вібрації призводять до вигину об'єкта, що є типовим для пластин і балок.
- Петльові моди: характерні для круглих мембран, де коливання поширюються у вигляді хвиль [13].

Резонатор функціонує в режимі другої форми коливань. Таким чином, стоячі хвилі — це коливання еліптичної форми з чотирма пучностями і чотирма вузлами, що розташовані по окружності края резонатора. Кут між суміжними вузлами/пучностями дорівнює 45 градусам. Еліптична форма коливань збуджується до певної амплітуди. Коли гіроскоп повертається навколо осі чутливості, результуючі Коріолісові сили, що впливають на елементи вібруючої маси резонатора збуджують другий режим коливань. Кут між головними осями двох

режимів складає 45 градусів [7]. Схематичне зображення другої форми коливань показано на рис. 13 [7].

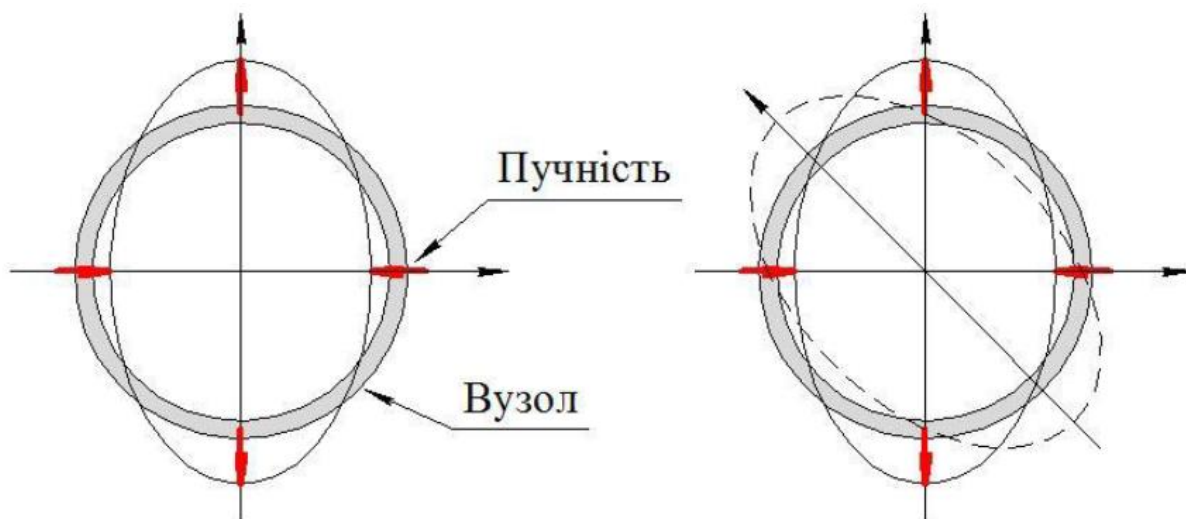


Рис. 13. Схематичне зображення другої форми коливань

За умови обертання резонатора, у якому збуджена стояча хвиля, з кутовою швидкістю Ω відбувається виникнення сил Коріоліса F_1, F_2, F_3, F_4 (рис. 14), які генерують вторинну (Коріолісову) моду коливань у напрямку результуючої сили F_c . Результуюча сила Коріоліса F_c пропорційна кутовій швидкості Ω , що вимірюється (2.1):

$$\vec{F}_c = 2m[\vec{\Omega} \times \vec{V}] \quad (2.1)$$

де V - вектор лінійної швидкості радіального руху в процесі вібрації; m - ефективна вібраційна маса [6].

Замкнута система управління гіроскопа спрямована на придушення другої моди коливання до нуля. Це досягається шляхом створення сили, яка пропорційна швидкості обертання датчика. Такий підхід дозволяє точно контролювати коливання і забезпечує високу точність вимірювань.

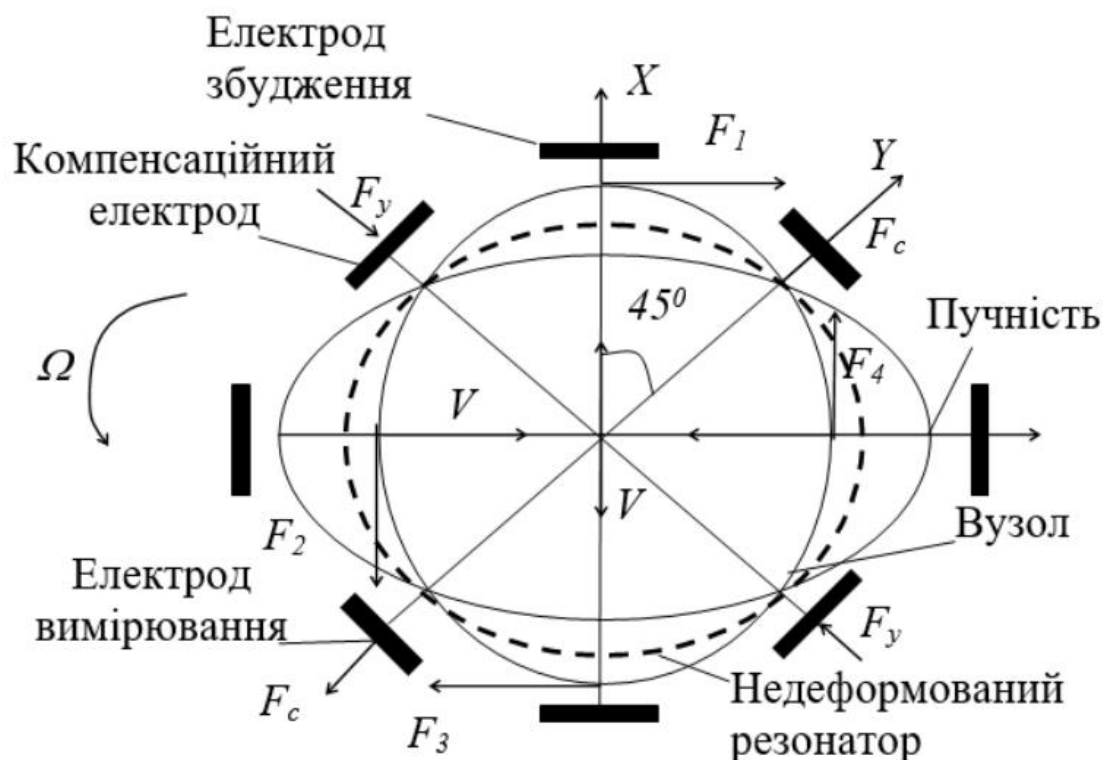


Рис. 14. Стояча хвиля в резонаторі

Система замкнутого контуру управління, яка використовується для цього, відома як компенсаційна система. Вона працює за рахунок генерування компенсаційної сили, яка протидіє небажаним коливанням. Для створення цієї сили та зчитування інформації про рух використовуються п'єзоелектричні елементи, закріплені на резонаторі. Ці елементи здатні генерувати електричний сигнал у відповідь на механічні деформації, що дозволяє точно вимірювати коливання і реагувати на них у реальному часі.

Електромеханічна система, що використовує п'єзоелектричні елементи, є дуже ефективною. Вона забезпечує низький рівень шуму вихідного сигналу, що є важливим для отримання точних і надійних даних. Крім того, така система має широкий діапазон вимірювання, що дозволяє використовувати її в різних галузях, від авіації і космічних досліджень до промислової автоматизації і медичного обладнання. Завдяки своїй високій точності і надійності, компенсаційна система замкнутого контуру управління є ключовим компонентом сучасних високотехнологічних гіроскопів.

На рис. 15 показана схема роботи КВГ в режимі датчика кутової швидкості (ДШК). В додатку 1 показана дання схема.

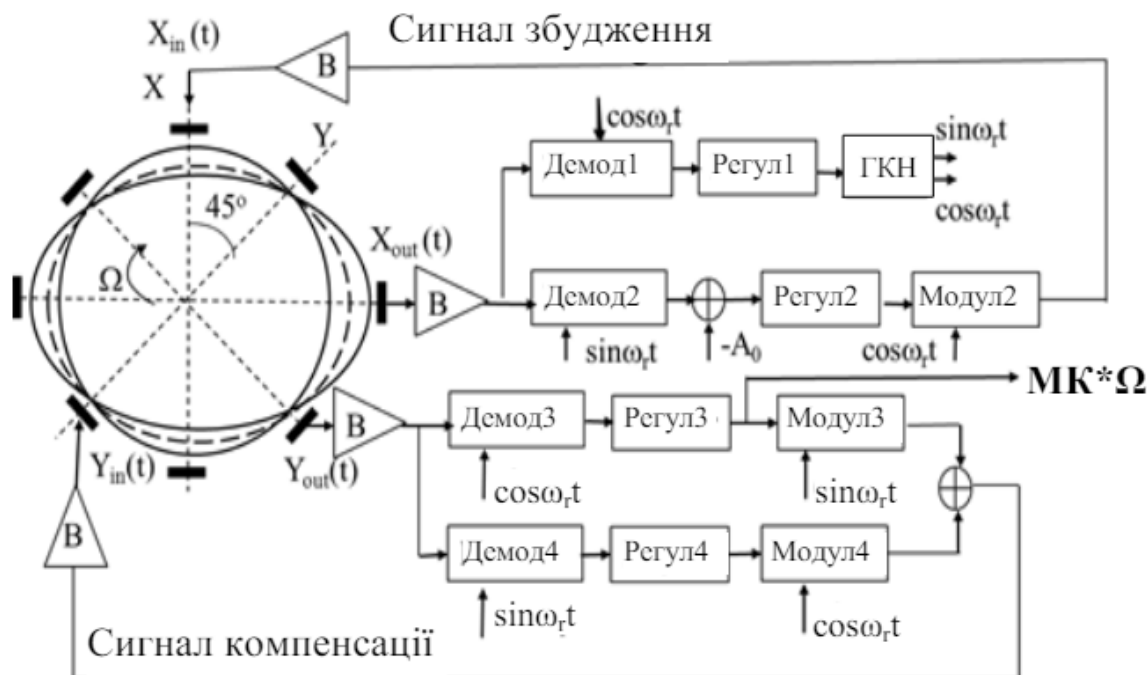


Рис. 15. Блок схема системи управління КВГ в режимі ДШК

Діаметрально протилежні електроди з'єднані між собою. Це дає сенсору два вхідних сигнали (X_{in} , Y_{in}) і два вихідних сигнали (X_{out} , Y_{out}) (рис. 15). Таким чином, сенсор можна розглядати як систему з двома входами і двома виходами. Коливання збуджуються періодичним сигналом, поданим на електрод X_{in} на резонансній частоті. Вихідний сигнал знімається з електрода X_{out} і використовується для підтримання коливань і відстеження змін резонансної частоти.

Амплітуда вторинного режиму знімається з електрода Y_{out} , розташованого у вузловій точці основної хвилі, і пригнічується за допомогою негативного зворотного зв'язку, шляхом подачі сигналу протилежної фази на електрод Y_{in} , розташований в іншій вузловій точці основної хвилі. Таким чином, амплітуда зворотного сигналу, яка компенсує коливання у вузловій точці, є пропорційною кутовій швидкості [14].

За допомоги програмного забезпечення Ansys® були отримані зображення різних мод коливань для різних форм резонаторів КВГ. На рис. 16 показана друга мода коливань резонатору першої форми. Резонансна частота склала 1741 Гц.

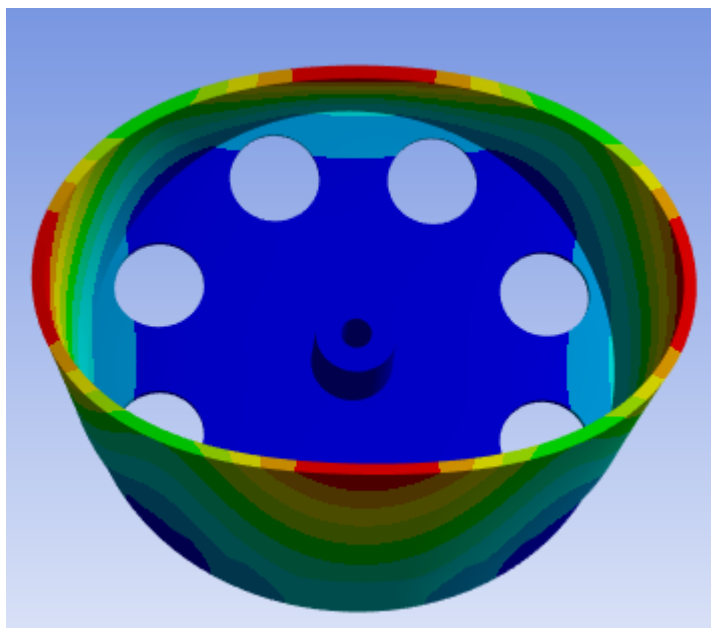


Рис. 16. Друга мода коливань резонатора першої форми

На рис. 17 показана третя мода коливань резонатору першої форми. Резонансна частота склала 4404 Гц.

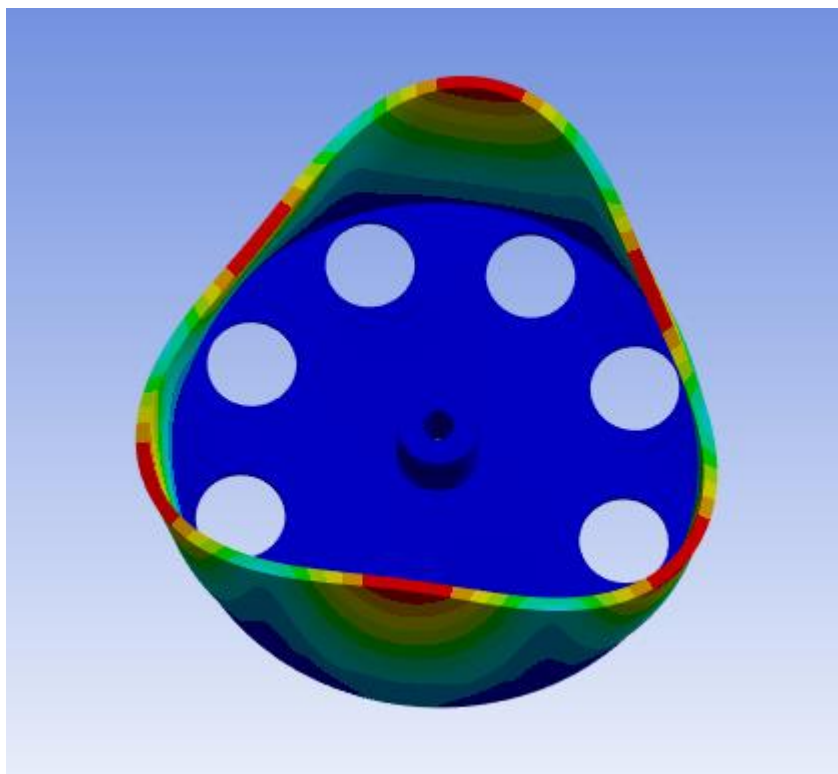


Рис. 17. Третя мода коливань резонатора першої форми

На рис. 18 показана друга мода коливань резонатору першої форми. Резонансна частота склала 7913 Гц.

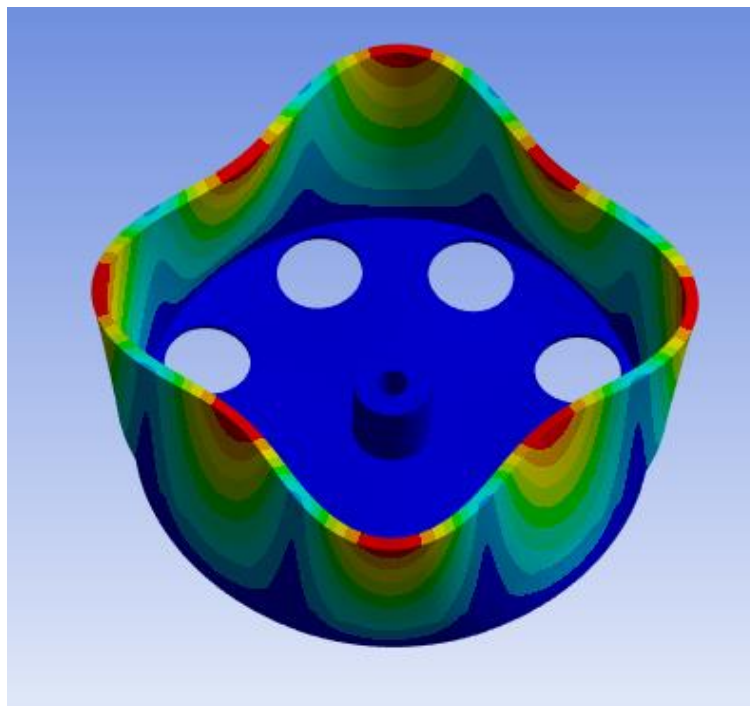


Рис. 18. Четверта мода коливань резонатора першої форми

На рис. 19 показана друга мода коливань резонатора першої форми. Резонансна частота склала 2256 Гц.

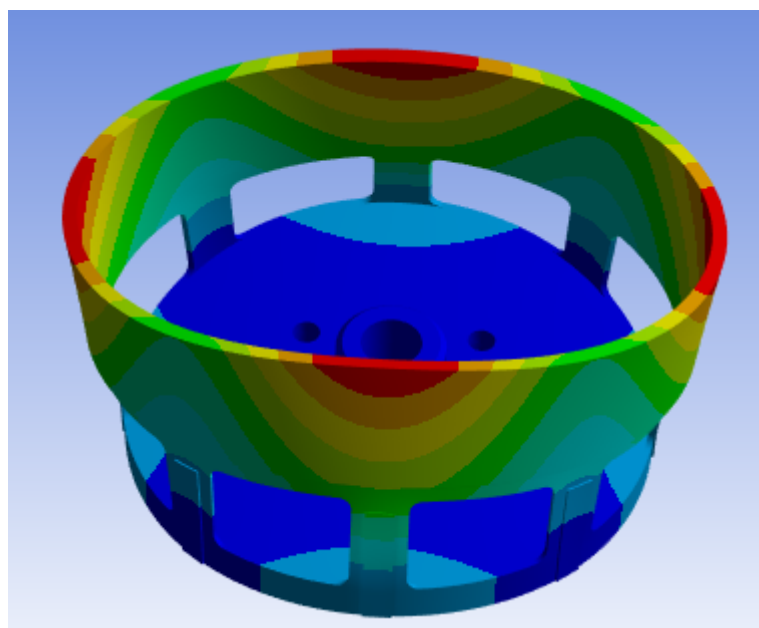


Рис. 19. Друга мода коливань резонатора другої форми

На рис. 20 показана друга мода коливань резонатору першої форми. Резонансна частота склала 4447 Гц.

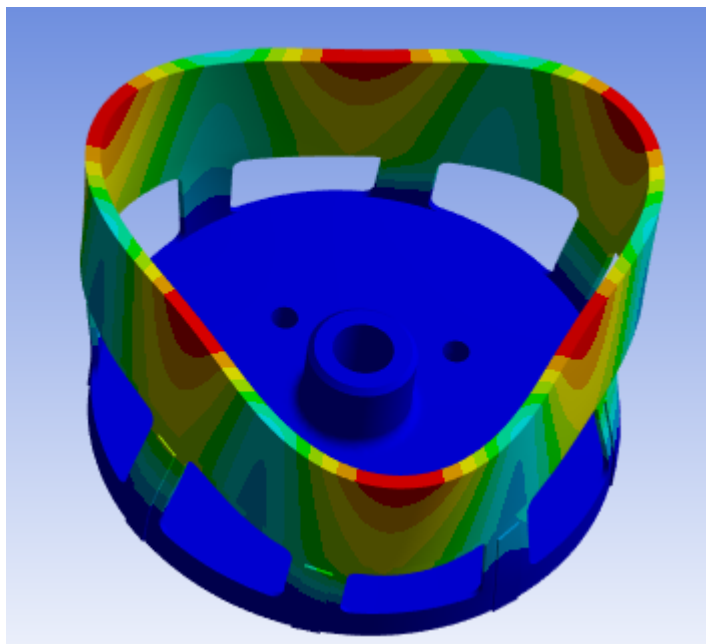


Рис. 20. Третя мода коливань резонатора другої форми

На рис. 21 показана друга мода коливань резонатору першої форми. Резонансна частота склала 7732 Гц.

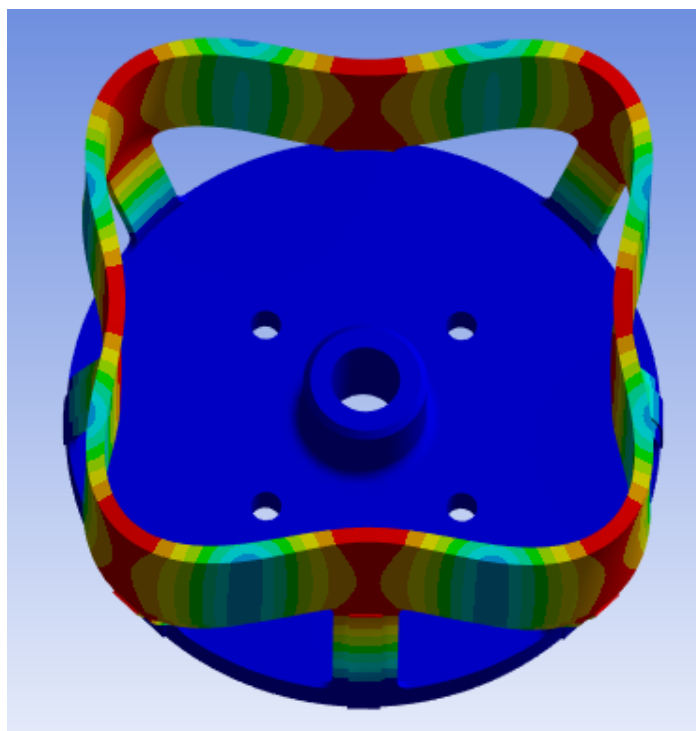


Рис. 21. Четверта мода коливань резонатора другої форми

2.2 Знаходження резонансної частоти

Резонансна частота — це певна частота, на якій коливальна система або резонатор природно прагне коливатися з максимальною амплітудою. Це явище виникає, коли частота зовнішньої сили, що прикладається до системи, збігається з її власною частотою коливань. У такій ситуації енергія, що передається системі, ефективно акумулюється, приводячи до значного збільшення амплітуди коливань. Резонанс є фундаментальним явищем у фізиці та інженерії, що використовується у багатьох практичних застосуваннях, таких як коливальні контури в електроніці, акустика, будівельна динаміка та інерційні сенсори. Резонансна частота є важливим параметром, який потрібно враховувати при проектуванні та аналізі коливальних систем. У багатьох випадках, таких як будівельна інженерія, небажані резонансні ефекти можуть призвести до катастрофічних наслідків. Наприклад, якщо резонансна частота будівлі збігається з частотою сейсмічних хвиль, це може викликати значні руйнування. З іншого боку, у багатьох технічних системах, наприклад, у фільтрах і осциляторах, резонансна частота використовується для досягнення бажаних характеристик. У таких випадках система налаштовується так, щоб працювати на резонансній частоті, забезпечуючи максимальну ефективність.

Резонатор КВГ виконаний у вигляді металевої циліндричної оболонки. В центрі дна цього циліндра, яке жорстко закріплене, встановлена п'єзокерамічна система для збудження коливань (рис. 22). Коли система збудження працює (використовуючи зворотний п'єзоелектричний ефект), в дні резонатора виникають згинальні коливання. Ці коливання передаються до робочої кромки резонатора, яка є циліндричною оболонкою, і створюють так звану стоячу хвилю. Ця стояча хвиля є джерелом інерціальної інформації про об'єкт, що обертається.



Рис. 22. розташування п'єзокераміки на резонаторі

При проектуванні такої складної динамічної системи, як КВГ, в першу чергу необхідно вибрати власні частоти резонатора таким чином, щоб унеможливити небажані резонансні ефекти [15].

Зважаючи на особливості побудови системи збудження коливань та її розташування робочою областю резонатора КВГ є циліндрична оболонка, причому її відношення висоти до діаметра з конструктивних міркувань зазвичай не перевищує 0,75. Саме цей параметр виберемо як основне. Для визначення попередньої точності результатів математичного моделювання МКЕ проведено порівняння отриманих значень робочої частоти циліндра з теоретичними.

2.3 Експериментальне визначення власних частот резонатора

Для визначення резонансної частоти використовують не тільки математичний метод. Одним з альтернативних методів це акустичний метод (рис. 16). він базується на збудженні коливань за допомогою короткочасного удару. Так як резонансна частота циліндричних металевих резонаторів знаходиться в звуковому діапазоні, це дає змогу фіксувати данні за допомогою мікрофону. Простий удар резонатором по обідку не дозволяє отримати повну картину його характеристик, оскільки фізичне збудження не створює повноцінної стоячої хвилі. Для отримання більш достовірних даних необхідно здійснювати удари по всій довжині обідка, поступово повертаючи резонатор відносно ударного пристрою з певним кроком. На рис.23 відображено

спеціалізоване обладнання для акустичного визначення резонансної частоти резонатора КВГ.

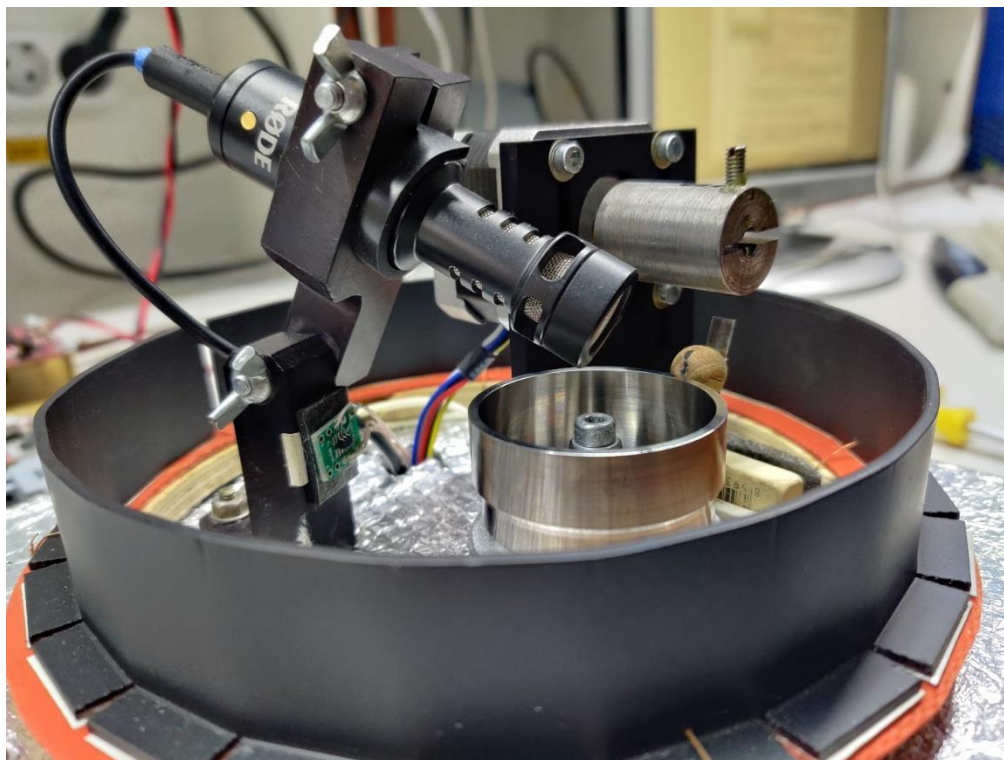


Рис. 23. Обладнання для акустичного визначення резонансної частоти КВГ

Під час акустичної перевірки можна також оцінити температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ) чутливого елемента, виконуючи вимірювання при різних температурах матеріалу резонатора. Це дозволяє визначити, як змінюються частотні характеристики резонатора під впливом температурних змін.

В результаті акустичної перевірки накопичується масив аудіо-файлів, які потім підлягають спектральному аналізу. В ході цього аналізу отримують амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) резонатора, яка включає його резонансні частоти та гармоніки. Робочі частоти резонатора залежать від його діаметру та товщини стінки. Форма резонансних частот дозволяє оцінити добротність чутливого елемента. Аналізуючи форму АЧХ на резонансних частотах, можна виявити розщеплення резонансної частоти на дві складові, що дає можливість оцінити різночастотність та різнодобротність резонатора [6].

Було проведено акустичну перевірку резонансної частоти обох форм резонатора. Для першої форми резонатора вона склала 1676 Гц. Для другої форми склала 2555 Гц.

2.4 Аналітичне знаходження частот вільних коливань циліндричного резонатора КВГ

Будемо вважати, що циліндричний резонатор КВГ є тонким нерозтягнутим пружним кільцем. Відомо, що частоти вільних коливань тонкого нерозтягнутого пружного кільця, яке не обертається, мають вигляд [16]:

$$\mu = \frac{k(k^2 - 1)}{2\pi\sqrt{k^2 + 1}} \sqrt{\frac{EI}{\rho SR^4}}, \text{ Гц} \quad (2.2)$$

де $k=2,3,\dots$ - номер моди коливань, що дорівнює половині числа вузлів на кільце; E – модуль Юнга; ρ – щільність матеріалу кільця; S – площа поперечного перерізу кільця; R – радіус кільця вздовж середньої лінії; I – момент інерції поперечного перерізу (якщо поперечний переріз - прямокутник з сторонами h та L , де h – товщина кільця, L – його ширина, тоді $I = \frac{Lh^3}{12}$).

Отже, якщо поперечний переріз - прямокутник з сторонами h та L , тоді $S=hL$. Якщо підставити праві частини площини S та моменту інерції поперечного перерізу I у формулу (2.2), отримаємо

$$\mu = \frac{k(k^2 - 1)}{2\pi\sqrt{k^2 + 1}} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho R^4}}. \quad (2.3)$$

Тобто, частоти вільних коливань тонкого нерозтягнутого пружного кільця не залежать від ширини поперечного перерізу L (висоти циліндру).

На рис.24 зображено графічна залежність частоти вільних коливань тонкого нерозтягнутого пружного кільця від моди коливань, коли матеріал – сталь: $\rho=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; $E=20,6 \cdot 10^{10}$ Н/м².

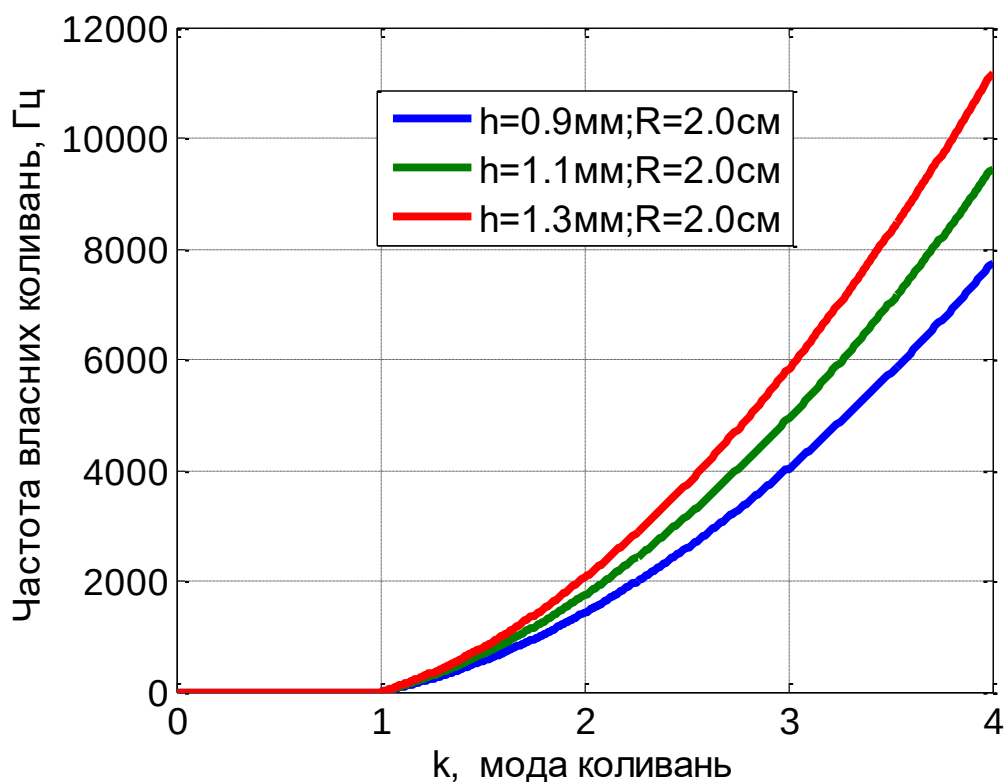


Рис.24. Залежність частоти вільних коливань від моди коливань резонатора зі сталі

Числові значення частоти вільних коливань тонкого нерозтягнутого пружного кільця від моди коливань для різних значень товщини кільця представлено в табл.9.

Таблиця 9. Резонансна частота резонатора зі сталі

k	μ , Гц ($h=0,9\text{мм}$)	μ , Гц ($h=1,1\text{мм}$)	μ , Гц ($h=1,3\text{мм}$)
2	1425.49134168244	1742.26719538965	2059.04304909685
3	4031.89837690545	4927.87579399555	5823.85321108564
4	7730.81223419254	9448.77050845755	11166.7287827226

Наступним етапом буде розрахунок резонансної частоти саме для матеріалу резонатора С300 (рис. 25). Параметри матеріалу $\rho=7999,5 \text{ кг/м}^3$; $E=16,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.

Таблиця 10. Резонансна частота резонатора зі С300

k	μ , Гц ($h=0,9\text{мм}$)	μ , Гц ($h=1,1\text{мм}$)	μ , Гц ($h=1,3\text{мм}$)
2	1271.163735115975	1553.644565141747	1836.125395167520
3	3595.393988395704	4394.370430261418	5193.346872127131
4	6893.853275529537	8425.820670091657	9957.788064653776

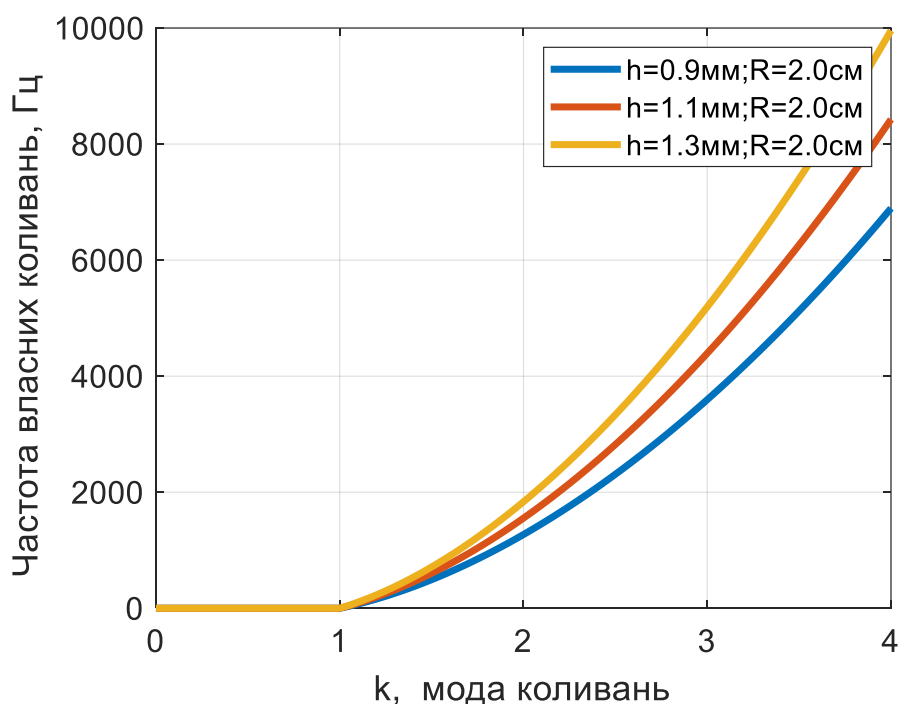


Рис. 25. Залежність частоти вільних коливань від моди коливань резонатора з матеріалу С300

Також відомо, що частоти вільних коливань тонкого нерозтягнутого пружного кільця, яке обертається з кутовою швидкістю Ω , мають вигляд [16]:

$$\mu = \frac{k(k^2 - 1)}{2\pi(k^2 + 1)} \sqrt{(k^2 + 1) \frac{EI}{\rho S R^4} + \Omega^2}, \text{ Гц} \quad (2.4)$$

Після аналогічних перетворень, як це було вище з формулою (2), можна отримати:

$$\mu = \frac{k(k^2 - 1)}{2\pi(k^2 + 1)} \sqrt{(k^2 + 1) \frac{Eh^2}{12\rho R^4} + \Omega^2}. \quad (2.5)$$

На рис.26 зображено графічна залежність частоти вільних коливань тонкого нерозтягнутого пружного кільця від моди коливань резонатора з різною кутовою швидкістю Ω , коли матеріал – сплав С300: $\rho=7999,5 \text{ кг/м}^3$; $E=16,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.

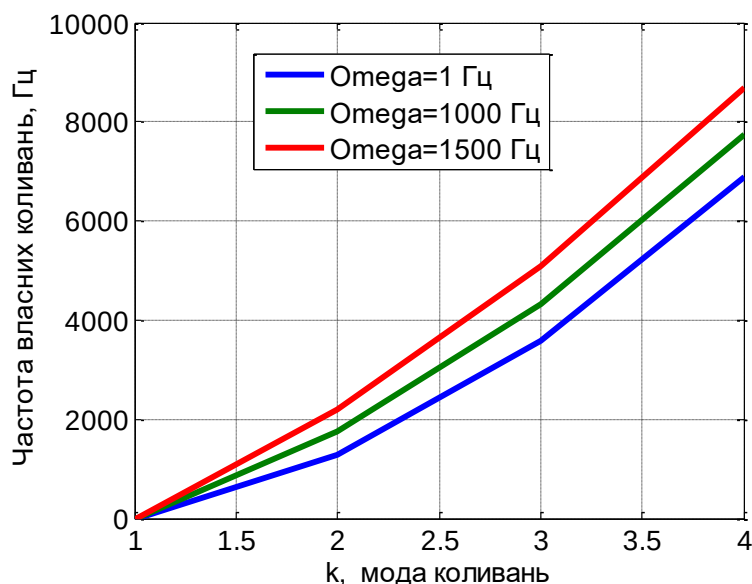


Рис. 26. Залежність частоти вільних коливань від моди коливань резонатора з різною кутовою швидкістю Ω

Числові значення частоти вільних коливань тонкого нерозтягнутого пружного кільця (матеріал – сплав С300) від моди коливань резонатора з різною кутовою швидкістю Ω представлено в табл.11.

Таблица 11. Резонансна частота від кутової швидкості

k	μ , Гц ($\Omega = 1$ Гц)	μ , Гц ($\Omega = 1000$ Гц)	μ , Гц ($\Omega = 1500$ Гц)
2	1271.16430152597	1748.10103869141	2203.60097147238
3	3595.39478942049	4322.82985228334	5087.91292494201
4	6893.85417899717	7744.8021530168	8692.11681038796

Можна зробити висновок, що на значення частот вільних коливань тонкого нерозтягнутого пружного кільця впливають значення кутової швидкості Ω на рівні власних частот. Особливе значення це буде мати для КВГ під час дії кутової вібрації основи.

2.5 Види збудження первинних коливань

Збудження первинних коливань у резонаторі є критичним етапом для точної роботи гіроскопів та інших інерціальних датчиків. Існує декілька основних методів для збудження коливань у резонаторах:

- П'єзоелектричне збудження (рис. 22):

Принцип роботи: п'єзоелектричні матеріали, такі як п'єзокераміка, мають властивість генерації механічних деформацій під впливом електричного поля. Коли на п'єзоелектричний елемент накладається електричний заряд, матеріал деформується, що призводить до виникнення механічних коливань у резонаторі.

Застосування: цей метод широко використовується у КВГ та інших інерціальних датчиках для створення первинних коливань резонатора [17].

- Електростатичне збудження:

Принцип роботи полягає в наступному: електростатичне збудження базується на створенні механічних коливань шляхом зміни електричного поля. Застосування електричного заряду змінює розподіл електричної напруги, що в свою чергу призводить до зміни форми резонатора і, як результат, до механічних коливань.

Цей метод активно використовується у МЕМС, таких як акселерометри та гіроскопи, для створення коливань у резонаторах [18].

- Магнітне збудження:

Принцип роботи: магнітне збудження використовує змінне магнітне поле для створення механічних коливань у резонаторі. Застосування змінного магнітного поля впливає на магнітосприйнятливі матеріали, що спричиняє їхню деформацію та виникнення коливань.

Застосування: цей метод широко використовується у резонаторах з магнітосприйнятливими матеріалами для створення коливань, а також у гальмівних системах і механічних актуаторах [19].

Розділ 3. Моделювання окремих частини збірки резонатора

3.1 Огляд п'єзокераміки

П'єзокераміка – це клас матеріалів, які виявляють п'єзоелектричні властивості, тобто здатність генерувати електричний заряд у відповідь на механічну деформацію і, навпаки, змінювати свої геометричні розміри при прикладанні електричного поля. Ці матеріали широко використовуються в різних галузях техніки та електроніки завдяки своїй високій ефективності та надійності.

П'єзоелектричні ефекти відіграють важливу роль у багатьох технологічних застосуваннях, зокрема в датчиках, актюаторах, генераторах і приймачах ультразвуку. Існують два основні п'єзоелектричні ефекти: прямий і зворотний.

Прямий п'єзоелектричний ефект (рис. 27)[20] полягає у виникненні електричного заряду на поверхнях кристала при його механічній деформації. Це явище вперше було відкрито П'єром і Жаком Кюрі в 1880 році. Вони помітили, що при механічному стисканні або розтягуванні кристалів кварцу на їхніх поверхнях з'являються електричні заряди.

Кристалічна решітка матеріалу складається з іонів, які займають певні положення в просторі. Під дією механічного навантаження іони зміщуються, що призводить до порушення симетрії і виникнення електричного дипольного моменту. У результаті цього на поверхнях матеріалу утворюються електричні заряди.

Прямий п'єзоелектричний ефект використовується в датчиках тиску, прискорення, вібрації та звуку. Наприклад, у мікрофонах, гідрофонах, п'єзоелектричних вагових датчиках і акселерометрах.

Зворотний п'єзоелектричний ефект (рис. 27)[20] полягає у зміні розмірів і форми п'єзоелектричного матеріалу під впливом прикладеного електричного поля. Це явище було передбачено теоретично та підтверджено експериментально тим самим Жаком Кюрі.

При прикладанні електричного поля до п'єзоелектричного матеріалу відбувається зміщення іонів у кристалічній решітці. Це призводить до механічної деформації матеріалу, зміни його розмірів і форми.

Зворотний п'єзоелектричний ефект використовується в актюаторах, ультразвукових генераторах, п'єзоелектричних динаміках і точних позиціруючих системах. Наприклад, у друкарських головках принтерів, системах точного позиціонування оптичних елементів і медичних ультразвукових апаратах.

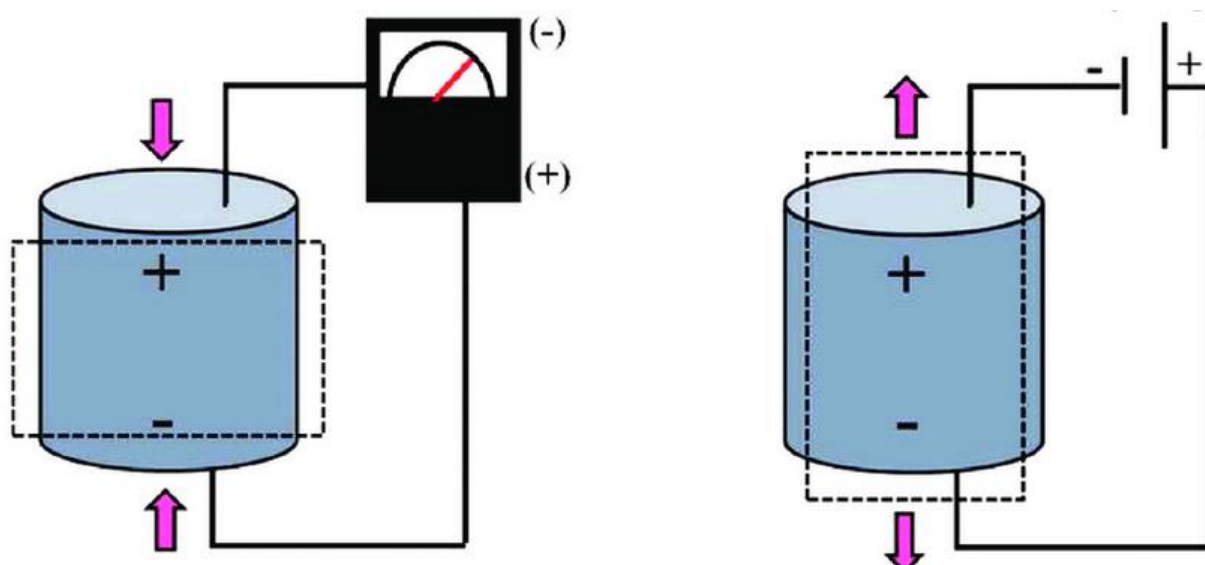


Рис. 27. П'єзоелектричні ефекти

П'єзоелектричні властивості мають певні кристалічні матеріали, які не мають центру симетрії. До таких матеріалів належать:

Кварц (SiO_2): Найбільш відомий природний п'єзоелектрик, широко використовується в годинниках, генераторах сигналу та сенсорах.

Титанат Барію (BaTiO_3): Керамічний матеріал, який часто використовується в конденсаторах і п'єзоелектричних пристроях.

Цирконат-Титанат Свинцю (PZT): Штучний п'єзоелектричний матеріал з високими п'єзоелектричними константами, широко використовується в промисловості.

У цій роботі була використана п'єзокераміка PZT-5H. Характеристики цього матеріалу наведені у таблиці 11. PZT-5H є високочутливим п'єзоелектричним матеріалом, який широко застосовується у різних галузях техніки завдяки своїм відмінним електромеханічним властивостям. Серед основних параметрів, які визначають

його ефективність, можна виділити діелектричну сталу, коефіцієнт електромеханічної зв'язності, константу п'єзоелектричного заряду та механічну добротність.[21].

Таблиці 12. Характеристики п'єзокераміки PZT - 5Н

Властивість	Символ	Одиниці виміру	PZT-5Н
Діелектрична стала (1 кГц)	K_3T		3800
Діелектрична втрата (1 кГц)	$\tan \delta$	%	2.0
Затискана діелектрична стала	K_1T		1600
Щільність	ρ	г/см ³	7.5
Коефіцієнт електромеханічної зв'язності (довжина)	k_{33}		0.75
Коефіцієнт електромеханічної зв'язності (площина)	k_{31}		0.37
Коефіцієнт електромеханічної зв'язності (об'єм)	k_p		0.60
Константа п'єзоелектричного заряду	d_{33}	10 ⁻¹² м/В	593
Константа п'єзоелектричного заряду	d_{31}	10 ⁻¹² м/В	-274
Коефіцієнт механічної добротності	Q_m		65
Температура Кюрі	T_c	°C	195
Коефіцієнт пружності (поздовжній)	Y_{31}	10 ¹² Н/м ²	5.6
Коефіцієнт пружності (поперечний)	Y_{33}	10 ¹² Н/м ²	4.8

3.2 Моделювання різних форм резонатора

У даній роботі було представлено дві основні форми резонатора. Перша форма (рис. 28) є більш класичною і використовується в більшості КВГ з циліндричним резонатором. В додатку 2 показано детальне креслення резонатора яке було виконане з дотриманням стандартів ДСТУ Б А.2.4-4.2009. Ця форма була обрана через її широке застосування та добре вивчені властивості, що дозволяє легше прогнозувати її поведінку в різних умовах експлуатації. Циліндричні резонатори забезпечують достатню точність і стабільність в умовах помірних навантажень, що робить їх популярними в стандартних конструкціях КВГ.

Друга форма резонатора (рис. 29) була розроблена з урахуванням вимог до підвищеної стійкості до механічних ударів, особливо вздовж осі чутливості. В додатку 3 показано детальне креслення резонатора яке було виконане з дотриманням стандартів ДСТУ Б А.2.4-4.2009. Це дозволяє використовувати цей тип резонатора в більш суворих умовах експлуатації, де можливі значні механічні навантаження. Завдяки вдосконаленій конструкції, друга форма резонатора може краще витримувати удари та вібрації, зберігаючи при цьому високу точність вимірювань.

Обидві форми резонаторів мають свої переваги та можуть бути оптимально застосовані залежно від специфічних умов та вимог до експлуатації. Класична форма забезпечує надійну роботу в стандартних умовах, тоді як вдосконалена форма з підвищеною стійкістю до ударів є більш придатною для використання в складних умовах, де можливі значні механічні навантаження. Ці форми призначені для використання у чутливому елементі який представлений в додатку 4.

На рис.28 зображена перша форма резонатора. Дана форма використовується у більшості КВГ з циліндричним резонатором.

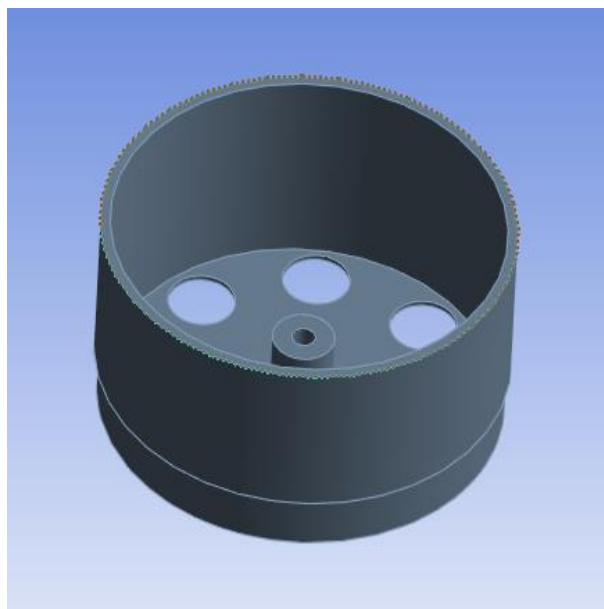


Рис. 28. Перша форма резонатора

Основною відмінністю цих конструкцій є розташування п'єзокерамічних елементів. У першій конструкції п'єзокераміка встановлюється на дні резонатора (рис. 29). Це рішення має кілька переваг, серед яких основною є спрощення процесу ви-

робництва. Розташування п'єзокераміки на дні резонатора дозволяє значно зменшити кількість необхідних технологічних операцій та спрощує монтаж компонентів. Завдяки цьому підходу, виробничий процес стає більш ефективним та менш затратним, що сприяє зниженню загальної вартості виготовлення резонаторів.

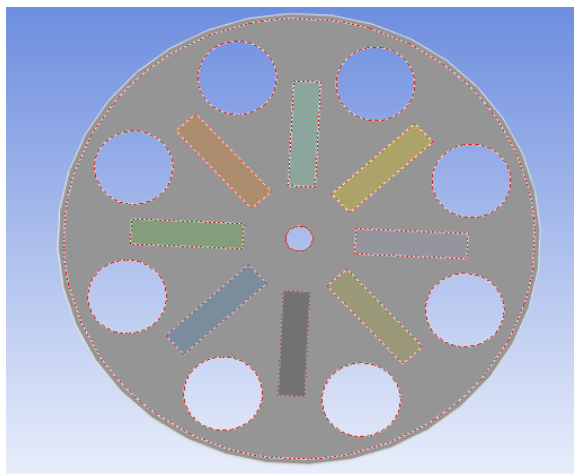


Рис. 29. Розташування п'єзокераміки першої форми резонатора

Крім того, така конфігурація забезпечує оптимальну передачу механічних коливань від п'єзокерамічного елемента до резонатора, що сприяє більш стабільному та точному збудженню коливань. Це особливо важливо для забезпечення високої якості та надійності роботи інерціальних сенсорів, які використовуються в різноманітних приладах і системах, від авіаційної техніки до медичних пристроїв. Таким чином, вибір розташування п'єзокераміки на дні резонатора є важливим фактором, який впливає на ефективність виробництва та експлуатаційні характеристики кінцевого продукту.

На рис.30 зображена друга форма резонатора, яка відрізняється від резонатора першої форми тим, що п'єзокераміка розташовується на боковій стінці резонатора (рис. 31).

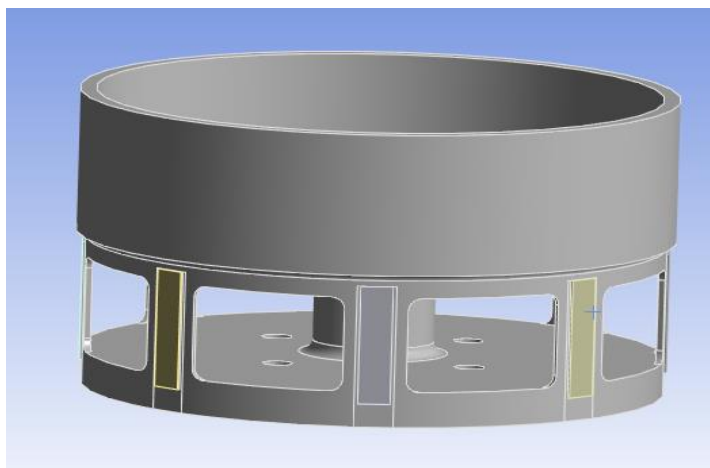


Рис. 30. Друга форма резонатора

Друга конструкція, хоча і є складнішою у виробництві, забезпечує значно більшу стійкість до ударів уздовж осі чутливості. Така конфігурація підвищує механічну міцність та стійкість до зовнішніх впливів, зокрема ударів і вібрацій. Завдяки розташуванню п'єзокерамічних елементів на боковій стінці, резонатор здатний краще протистояти деформаціям і зберігати свої робочі характеристики навіть у складних умовах експлуатації. Це робить його ідеальним для використання у високонавантажених середовищах, де надійність і довговічність є критично важливими параметрами.

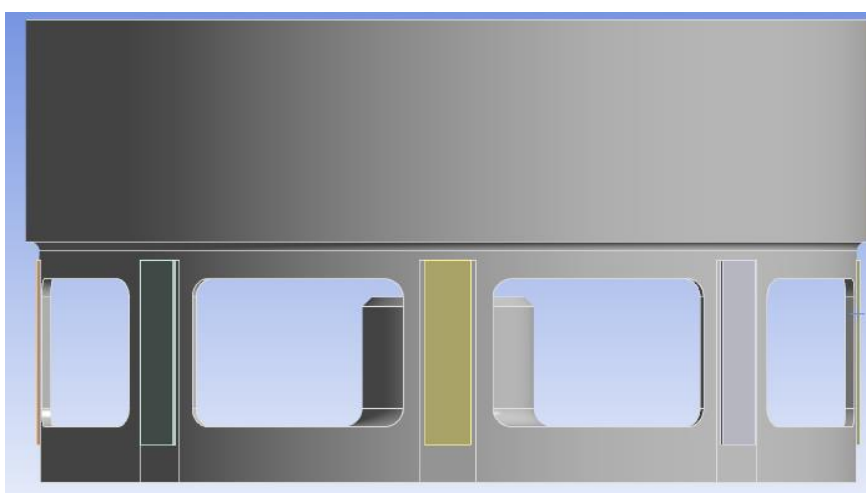


Рис. 31. Розташування п'єзокераміки другої форми резонатора

Матеріал який використовується це інваровий сплав С300 (мартенситно-старіючі сталі з 18% нікелю). Хімічний склад показаний в табл. 13. Одною з основних перевагою мартенситно-старіючих сталей є можливість старіння цих нікелевих мартенситно-старіючих сталей. У розчинному отжиганні (як поставляється клієнту), вони дуже міцні, відносно м'які (30/35 Rc) і, отже, легко обробляються та формуються. Після обробки або формування процес старіння, який не вимагає захисної атмосфери та відносно низьких температур у печі, підвищує твердість до рівня, достатнього для багатьох інструментальних застосувань. Основні характеристики представлені в табл.14.

Таблиця 13. Хімічний склад С300

Елемент	Ni	Co	Mo	Ti	Mn	Si	Al	C	Zr	P	S	B
Відсоток, %	18.5	9	4.8	0.60	0.10	0.10	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.003

Таблиці 14. Основні характеристики матеріалу С300

Щільність, кг м ⁻³	7999,5
Термальний коефіцієнт, 1/°C	5,6·10 ⁻⁵
Модуль Юнга, Па	16,8·10 ¹⁰
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Модуль об'ємної пружності, Па	1,4·10 ¹¹
Модуль зсуву матеріалу, Па	6,4615·10 ¹⁰

3.3 Моделювання збірки резонатора

Моделювання проводилось у програмі Ansys®, відомій своїми потужними можливостями для чисельного аналізу та симуляції фізичних процесів. Першим кроком у процесі моделювання було створення геометричної моделі резонатора, яка мала бути параметризованою. Це означало, що модель повинна дозволяти зміну певних параметрів для аналізу їхнього впливу на поведінку системи.

У нашому випадку ключовим параметром, який змінювався, була відстань від центру резонатора до початку п'єзокераміки. Цей параметр є важливим, оскільки він

безпосередньо впливає на розподіл механічних напружень і, відповідно, на ефективність п'єзоелектричного ефекту. Зміна відстані від центру до початку п'єзокерамічного елемента дозволяє дослідити, як це впливає на частоту і амплітуду коливань, а також на загальну добротність резонатора.

Для забезпечення точності моделювання було застосовано детальну сітку елементів, яка допомагає більш точно врахувати складні механічні взаємодії в системі. Завдяки можливостям Ansys®, вдалося виконати кілька ітерацій моделювання, змінюючи ключовий параметр та аналізуючи отримані результати. Цей підхід дозволив визначити оптимальне розташування п'єзокераміки, що забезпечує максимальну ефективність роботи резонатора в умовах різних навантажень.

Після створення моделі було проведено аналіз Modul для знаходження резонансної частоти методом чисельного моделювання. Модальний аналіз є важливою частиною досліджень вібраційних характеристик конструкцій, оскільки він дозволяє визначити природні частоти системи, форми коливань і відповідні деформаційні стани.

Далі була створена детальна сітка кінцевих елементів для геометричної моделі. Що в свою чергу дасть високу точність розрахунку. Потім було створено матеріали для моделювання. Основним матеріалом для резонатора виступив S300 [7]. Для п'єзокераміки було взятий матеріал з внутрішньої бібліотеки програми.

Результати модального аналізу надали інформацію про природні частоти і відповідні форми коливань резонатора. Ці дані були критично важливими для подальшої оптимізації конструкції, оскільки дозволили оцінити вплив змін параметрів на робочі характеристики резонатора. Зокрема, було визначено, як зміна відстані від центру до початку п'єзокераміки впливає на резонансну частоту, що дало можливість налаштувати конструкцію для досягнення оптимальної продуктивності.

Загальна деформація резонатора не може, в повному обсязі, показати нам ефективність збірки. Тому наступний тип аналізу був Coupled Field Harmonic. Він дозволяє досліджувати гармонічні процеси. Також цей процес дозволяє використовувати п'єзокераміку в ролі актюаторів гармонічних коливань. Таким чином була мо-

жливість спостерігати не лише деформацію, але і напругу яку генерувала п'єзокераміка. Також є можливість спостерігати деформацію лише п'єзокераміки.

На рис. 32 показано деформацію п'єзокераміки в резонаторі першої форми. Для повної оцінки деформації фіксувалась величина напруги яку генерувала п'єзокераміка. Для цього приймаємо що напруга на збуджуючій п'єзокераміці дорівнює 1 В. Значення генерації склало 0,51846 В для першої форми резонатора.

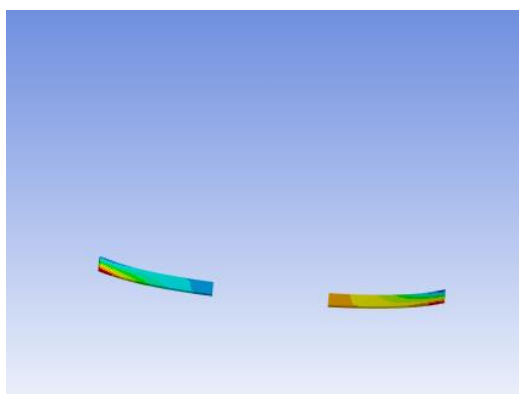


Рис. 32. Деформація п'єзокераміки першої форми резонатора

На рис. 33 представлена деформація п'єзокераміки. Величина згенерованої напруги склала 413,55 В.

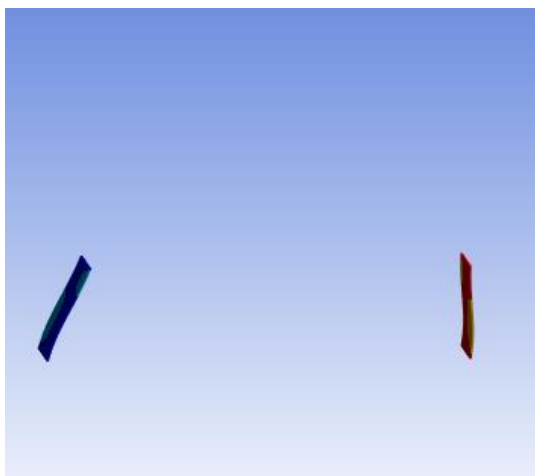


Рис. 33. Деформація п'єзокераміки другої форми резонатора

Ці результати дозволяють оцінити, наскільки ефективно п'єзокераміка працює в різних формах резонатора і як її деформації впливають на загальну напругу, що генерується системою. Такий підхід дозволяє оптимізувати конструкцію резонатора,

забезпечуючи кращу ефективність і продуктивність. Аналіз деформацій та напруги п'єзокераміки є критично важливим для розуміння поведінки резонаторів і для подальшої оптимізації їх параметрів.

Розділ 4. Оптимізація розташування п'єзокераміки

4.1 Оптимізація першої форми резонатора

Було проведено моделювання кілька разів з різною відстанню від центру до п'єзокерамічного елемента. Основною метою цих експериментів було визначити, як зміна розташування п'єзокераміки впливає на генеровану напругу на виході резонатора. Результати показали, що чим далі від центру моделі розміщений п'єзокерамічний елемент, тим більшу напругу він генерує на виході. Це пояснюється тим, що зі збільшенням відстані від центру зростає амплітуда згинальних коливань, що в свою чергу підвищує електричний відгук п'єзокерамічного матеріалу.

Усі моделювання проводились у програмному забезпеченні ABSYS® Результати моделювання детально відображені в таблиці 14, де наведені значення генерованої напруги для різних відстаней. Крім того, для наочності результати моделювання представлені на рис. 34-36, які ілюструють деформацію моделі при різних розташуваннях п'єзокерамічного елемента. Ці рисунки показують, як зміна відстані впливає на розподіл напружень і деформацій у резонаторі. Вони наочно демонструють збільшення амплітуди коливань і відповідну генерацію напруги зі збільшенням відстані від центру. Таким чином, проведений аналіз дозволяє зробити висновок про оптимальне розташування п'єзокерамічного елемента для досягнення максимальної ефективності роботи резонатора, що є важливим для подальшого вдосконалення конструкції та її використання в практичних застосуваннях.

Таблиця 14. Результати моделювання першої форми резонатора

Відстань від центру до п'єзокераміки, мм	Генерована напруга, мВ
5	518,46
7	286,85
10,5	874,43

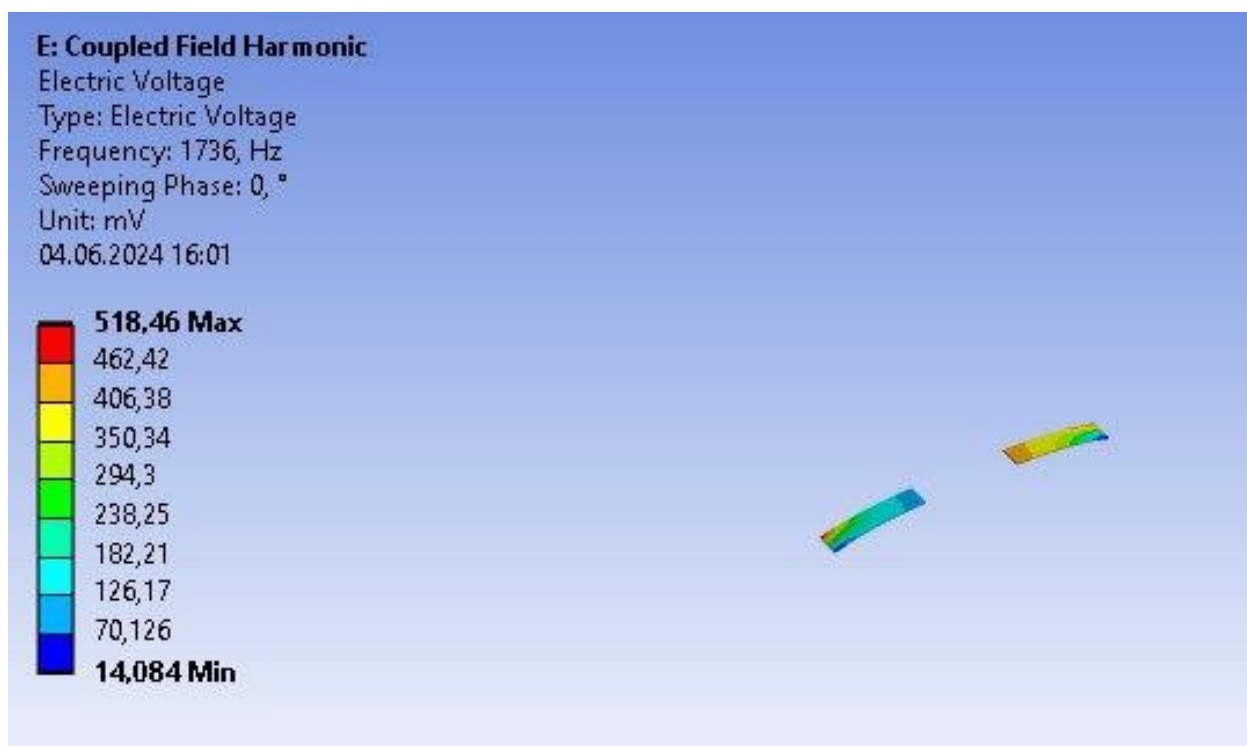


Рис. 34. Відстань від центру до п'зокераміки 5 мм

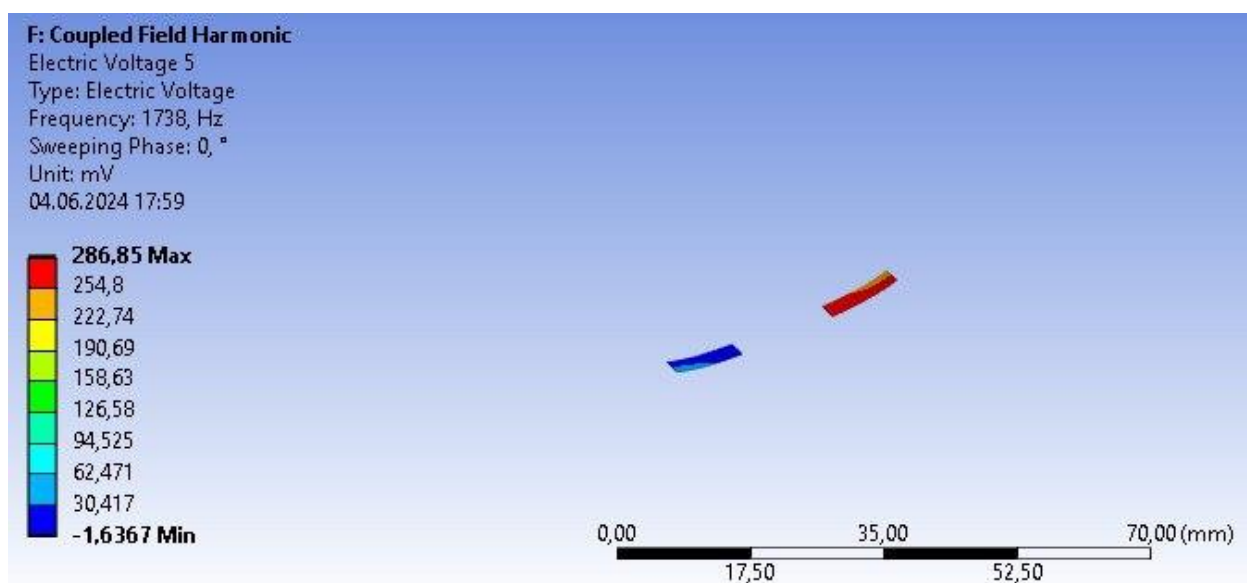


Рис. 35. Відстань від центру до п'зокераміки 7 мм

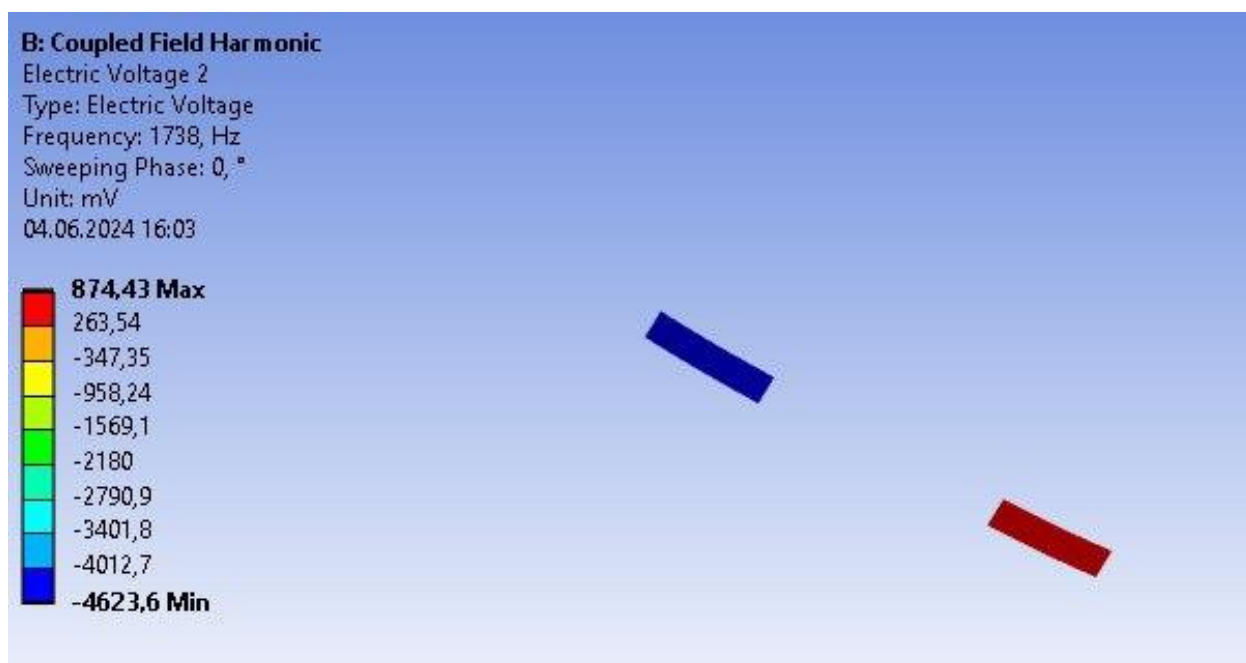


Рис. 36. Відстань від центру до п'зокераміки 10,5 мм

Після проведеного моделювання стало очевидно, що розташування п'єзокерамічного елемента суттєво впливає на генеровану напругу. На різних ділянках резонатора генеруються різні значення напруги, що пов'язано з характером деформацій у цих зонах.

На рис. 34 показано середнє значення напруги, що генерується п'єзокерамікою. Це обумовлено тим, що в цій ділянці резонатор має найбільшу жорсткість, що забезпечує стабільну, але не максимальну деформацію. Середня напруга свідчить про рівномірний розподіл механічних напружень у даній зоні.

На рис. 35 можна побачити зниження напруги, що означає, що в цьому місці деформація є досить низькою. Це може бути викликано кількома факторами: мала деформація у поєднанні з великим загальним переміщенням резонатора призводить до меншої генерації напруги. Такий розподіл напруги може свідчити про наявність областей з підвищеною жорсткістю або зон, де резонатор менш піддатливий до деформації.

На рис. 36 видно максимальну деформацію та, відповідно, максимальну генеровану напругу. Це обумовлено зменшеною жорсткістю через розташування отворів у дні резонатора. Отвори створюють зони концентрації напруги, що сприяє збіль-

шенню деформацій у цих областях. Зменшена жорсткість дозволяє резонатору легше деформуватися, що призводить до більшої ефективності п'єзокерамічного елемента у генеруванні напруги.

Загалом, результати моделювання підтверджують, що розташування п'єзокераміки та конструктивні особливості резонатора мають критичний вплив на його робочі характеристики. Оптимальне розташування п'єзокерамічного елемента може значно підвищити ефективність генерації напруги, що є важливим для подальшого вдосконалення форми і використання резонатора в практичних приладах. Детальне креслення резонатора після оптимізації представлено в Додатку 5.

4.2 Оптимізація другої форми резонатора

Друга форма відрізняється розташуванням п'єзокераміки. У цій формі було досліджено вплив відстані від дна резонатора до п'єзокерамічного елемента. Основна мета полягала у визначенні оптимального розташування п'єзокераміки для досягнення найкращих характеристик роботи резонатора.

Результати моделювання показали, що зміна відстані від дна резонатора до п'єзокерамічного елемента значно впливає на генеровану напругу та деформаційні характеристики. Зі збільшенням цієї відстані змінюється розподіл напружень і деформацій, що впливає на ефективність роботи п'єзокерамічного матеріалу.

Детальні результати дослідження наведені в табл. 15, де представлені значення генерованої напруги для різних відстаней. Для наочності ці результати також показані на рис. 37-39, які ілюструють деформацію моделі при різних розташуваннях п'єзокерамічного елемента. Ці рисунки наочно демонструють, як зміна відстані від дна резонатора до п'єзокераміки впливає на робочі характеристики резонатора, дозволяючи визначити оптимальне розташування для максимізації його продуктивності та надійності.

Таблиця 15. Результати моделювання другої форми резонатора

Відстань від нижньої площини до п'зокераміки, мм	Генерована напруга, мВ
2,5	423,55
1	661,59
0	900,69

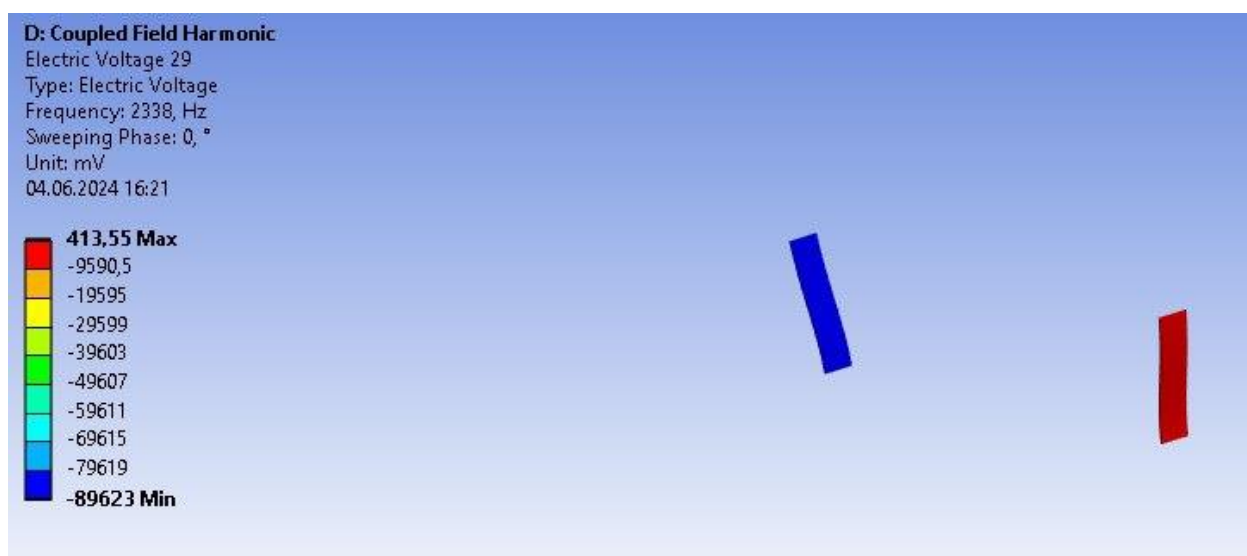


Рис. 37. Відстань від нижньої площини до п'зокераміки 2,5 мм

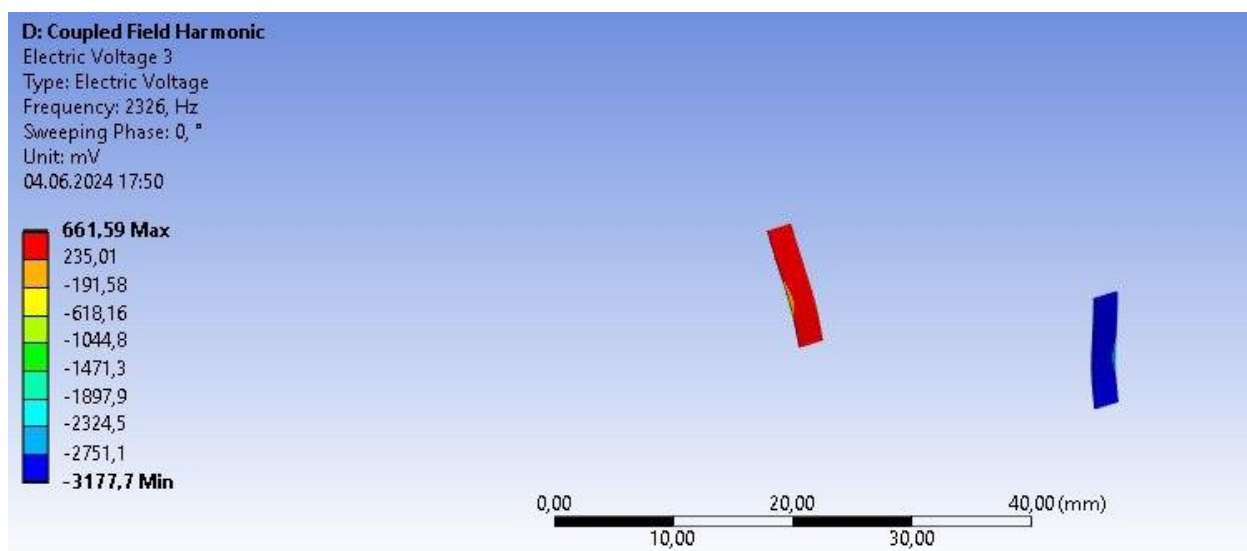


Рис. 38. Відстань від нижньої площини до п'зокераміки 1 мм

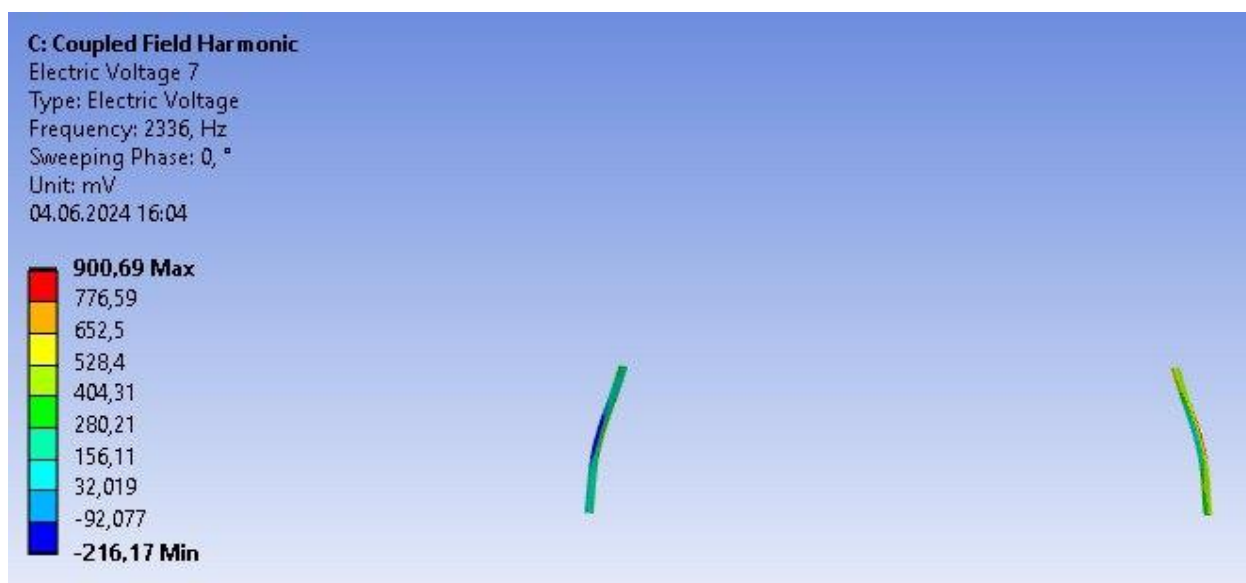


Рис. 39. Відстань від нижньої площини до п'єзокераміки 0 мм

Підбиваючи підсумки, можемо зробити висновок про найбільш ефективне розташування п'єзокерамічного елемента у другій формі резонатора. Найкращі результати були досягнуті при мінімальній відстані від нижньої площини резонатора. В додатку 6 показане детальне креслення. Це розташування забезпечує максимальну генерацію напруги, що свідчить про оптимальне поєднання деформаційних характеристик та жорсткості матеріалу.

На рис. 37 показано, що деформація була мінімальною, а відповідно і генерація напруги теж мінімальна. Це демонструє, що при великій відстані від нижньої площини резонатора деформація є малою, а переміщення великим, що негативно впливає на ефективність роботи п'єзокерамічного елемента.

На рис. 38 представлено середнє значення генерованої напруги. Це показує, що встановлення п'єзокерамічного елемента посередині отвору не є оптимальним варіантом. Хоча деформації в цій зоні достатні для генерації напруги, вони не досягають максимальних значень, що можна спостерігати в інших конфігураціях.

На рис. 39 показано найбільшу генерацію напруги. Це свідчить про те, що між товстим та жорстким дном резонатора та тонкою стінкою відбувається максимальна деформація. Зменшена жорсткість стінок у порівнянні з дном призводить до значних згинальних коливань, що підвищує ефективність п'єзокерамічного елемента в цій

конфігурації. Таким чином, вибір розташування п'єзокерамічного елемента має вирішальне значення для оптимізації робочих характеристик резонатора.

4.3. Проблеми та подальші дослідження КВГ

Незважаючи на значний прогрес, існують деякі проблеми, які потребують подальших досліджень і розробок. Одним з них є покращення термічної стабільності гіроскопів, оскільки зміни температури можуть впливати на точність вимірювань. Іншим важливим напрямком є зниження вартості виробництва, щоб зробити ці пристрої більш доступними для широкого кола застосувань. КВГ з циліндричним резонатором знаходяться на передовій сучасних технологій інерціальної навігації. Завдяки постійному розвитку матеріалів, технологій виробництва, ці гіроскопи продовжують вдосконалюватися, знаходячи нові області застосування та підвищуючи ефективність існуючих систем. Перспективи їх подальшого розвитку залишаються дуже обнадійливими, що робить їх важливими компонентами у багатьох високотехнологічних галузях. Однією з ключових характеристик металевого циліндричного резонатору є різночастотність його четвертої моди коливань. Висока різночастотність значно зменшує точність кінцевих характеристик гіроскопу [6].

Висновки

Розташування п'єзокерамічного елемента на резонаторі є критично важливим для ефективної роботи КВГ. Від цього залежить точність чутливого елементу, а також рівень шумів, які можуть заважати знімати корисний сигнал. П'єзокераміка повинна бути розташована таким чином, щоб максимізувати генеровану напругу, забезпечуючи при цьому високу стабільність та низький рівень шуму.

Розташування п'єзокерамічного елемента впливає на резонансні характеристики резонатора. Залежно від позиції п'єзокераміки можуть змінюватися власні частоти коливань резонатора, що безпосередньо впливає на точність вимірювань і стабільність роботи гіроскопа. Наприклад, встановлення п'єзокерамічного елемента близько до дна резонатора може збільшити жорсткість і зменшити небажані резонансні ефекти, що покращує загальні характеристики чутливого елементу.

В першому розділі було оглянуто загальний стан КВГ у світі. Визначені основні напрямки використання. Розглянуто прилади основних виробників КВГ. Оглянуто особливості конструкції резонаторів. Було визначено що точність КВГ сильно залежить від форми та матеріалу резонатора.

В другому розділі було розглянуто основні моди коливань резонатора. Також визначено частоти власних коливань різними методами. Визначено що резонансна частота залежить від кутової швидкості основи. Розглянуто основні способи збудження первинних коливань резонатора.

В третьому розділі було оглянуто п'єзокераміку, як збуджувач первинних коливань резонатора. Обрано тип п'єзокераміки. Було запропоновано дві основні форми резонатора. Було обрано матеріал. Було проведено моделювання збірки з початковими характеристиками.

Четвертий розділ присвячений оптимізації розташування п'єзокераміки для обох форм резонатора. Було проведено ряд моделювань для визначення оптимального та найбільш оптимального розташування п'єзоелементів. Сформовано таблиці для наглядності.

Після проведення остаточного моделювання підбити підсумки. Розташування п'єзокераміки є важливим етапом при проектуванні збірки резонатора. Після оптимізації результати показали підвищення ефективності збірки.

Література

- [1] В. Апостолук, “Узагальнена теорія та методи проектування коріолісових вібраційних гіроскопів,” 2016, 264 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/16278/1/Apostolyuk_diss.pdf
- [2] Judy J.-S. materials and Structures and undefined 2001, “Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications,” iopscience.iop.org, 2001, doi: 10.1088/0964-1726/10/6/301.
- [3] “Scale factor stability (i.e., the accuracy of the gyroscope in... | Download Scientific Diagram.” URL: https://www.researchgate.net/figure/Scale-factor-stability-ie-the-accuracy-of-the-gyroscope-in-monitoring-the-sensed_fig1_320292459
- [4] V. M. N. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo, and C. E. Campanella, “Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective,” Sensors 2017, 22 с. doi: 10.3390/S17102284.
- [5] L. Zeng, Y. Tao, Y. Pan, J. Liu, K. Yang, and H. Luo, “Experimental Study on Variation of Surface Roughness and Q Factors of Fused Silica Cylindrical Resonators with Different Grinding Speeds,” Micromachines 2021, 8 с. 08.2021, doi: 10.3390/M112091052.
- [6] Г. Строкач, “Вдосконалення методу визначення характеристик чутливого елемента твердотільного вібраційного гіроскопа на етапі балансування,” 2022, 130 с., URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/85b7d7f0-c368-46bd-be95-1aea217df2fc/download>
- [7] О. Петренко, “Удосконалення методів підвищення точності вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним резонатором,” 2020, 218 с., URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/f48d2e71-516d-4315-951d-61795b14c9ae/download>
- [8] В. Аврутов, “Розвиток теорії автономного визначення навігаційних параметрів рухомих та нерухомих об’єктів,” 2020, 309 с., URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38490/1/Avrutov_dys.pdf
- [9] “The Scalable SIRUTM family of products combines innovation and high reliability-with 100 percent mission success in more than 35 million on-orbit hours-

for precision performance on space missions,” 2016, URL: www.northropgrumman.com

- [10] F. Delhaye and J.-P. Girault, “SpaceNaute®,” researchgate.net, 2018, URL: https://www.researchgate.net/profile/Fabrice-Delhaye/publication/325417403_SpaceNaute_R_HRG_technological_breakthrough_for_advanced_space_launcher_inertial_reference_system/links/5b0d3d364585157f871d9889/SpaceNaute-R-HRG-technological-breakthrough-for-advanced-space-launcher-inertial-reference-system.pdf
- [11] “CVG Series.” URL: <https://www.innalabs.com/cvg-series>
- [12] “Гіроскопи та навігаційні системи – Elmiz.” URL: <http://www.elmiz.com/product-category/gyroscopes-and-navigation-systems-ukr/>
- [13] “Vibration of Continuous Systems - Singiresu S. Rao - Google Книги.” URL: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=8zqDDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=%22Mechanical+Vibrations%22+by+Singiresu+S.+Rao&ots=ALBKAkzEIR&sig=mVCSRxAwfxWL2y2gp873z8ll7hs&redir_esc=y#v=onepage&q=%22Mechanical Vibrations%22 by Singiresu S. Rao&f=false
- [14] V. Chikovani, H. Tsiрук, O. K.- Військово-технічний, and undefined 2018, “Три-режимний вібраційний гіроскоп,” vtz.asv.gov.ua, 2018, 8 с., URL: <http://vtz.asv.gov.ua/article/view/144934>
- [15] Т. Бакалор, П. Бондар, “Определение рабочей частоты колебаний кориолисова вибрационного гироскопа,” 2005, 4 с., URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/11541/1/2.2.Pdf>
- [16] В. Журавлев, Д. Климов, “Волновой твердотельный гироскоп,” 1985, URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23449526>
- [17] M. Vijaya, “Piezoelectric materials and devices: applications in engineering and medical sciences,” 2012, URL: <https://books.google.com/books?hl=ru&lr=&id=TWc8Ow422hwC&oi=fnd&pg=P1&dq=Piezoelectric+Materials+and+Devices&ots=i3pNXJS2PJ&sig=kApuVd05zZBxvUDHQhg-qNOjjLI>

- [18] M. Gad-el-Hak, “The MEMS handbook,” 2001, URL: <https://books.google.com/books?hl=ru&lr=&id=g0v3r6WNaBkC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Microelectromechanical+Systems++by+Mohamed+Gad+el+Hak&ots=2h3J2L64y5&sig=yXudMxwxIfszivsO55ngsKtmT1E>
- [19] C. Vittoria, “Magnetics, Dielectrics, and Wave Propagation with MATLAB® Codes,” 2023, URL: <https://books.google.com/books?hl=ru&lr=&id=8ZXXEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=P1&dq=+Magnetics,+Dielectrics,+and+Wave+Propagation+with+MATLAB®+Codes++by+Carmine+Vittoria&ots=r1dPfRCdKz&sig=YtfK2yYR5vutoHsWVhReFaRN8NY>
- [20] “Direct and converse piezoelectric effect. | Download Scientific Diagram.” URL: https://www.researchgate.net/figure/Direct-and-converse-piezoelectric-effect_fig2_329228323
- [21] “PZT-5H_Datasheets.” URL: <https://info.piezo.com/hubfs/Data-Sheets/piezo-material-properties-data-sheet-20201112.pdf>