МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра нетрадиційної енергетики та екології

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Дослідження та комп'ютерне моделювання акустичного резонансу»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-61 Григоренко Т.О.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали освітня програма: нетрадиційна енергетика та екологія
Керівник: кандидат фізико-математичних наук,доцент Кудрявцев І.М.
Рецензент: Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» Ткаченко В.І.

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп’ютерної фізики та енергетики

Кафедра нетрадиційної енергетики та екології

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр

Спеціальність: 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Освітня програма: Нетрадиційна енергетика та екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр КУЛИК

підпис

«_____» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра студентові Григоренку Тимофію Олександровичу

1. Тема роботи «Дослідження та комп'ютерне моделювання акустичного резонансу», керівник роботи Кудрявцев Ігор Миколайович, кандидат фізико-математичних наук, доцент
2. Строк подання студентом роботи 3 грудня 2024 р.
3. Перелік питань, які потрібно розглянути:
   1. Ознайомитися з видами комп’ютерного моделювання акустичних процесів.
   2.
   3. Провести порівняння теоретичних методів та методів комп’ютерного аналізу.
   4. Навчитися проводити акустичний аналіз тіла за допомогою програм моделювання.

4.План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми.
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Обговорення відгуку та, рецензії. Підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання 21 вересня 2024 р.

Студент _____ Тимофій ГРИГОРЕНКО

підпис

Керівник роботи _____ Ігор КУДРЯВЦЕВ

підпис

РЕФЕРАТ

Григоренко Тимофій «Дослідження та комп'ютерне моделювання акустичного резонансу»

Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Х.: Харківській національний університет імені В. Н.Каразіна, 2024. – 28 с.

У роботі досліджуються питання реалізації комп’ютерного моделювання акустичного резонансу, аналізуються його особливості та сфери використання. На першому етапі йде ознайомлення з теоретичною базою акустичного резонансу та методами комп’ютерного моделювання цього процесу. Надалі розглядається теоретична модель з підрахованими параметрами, з якою виконується порівняльний аналіз. Далі проводиться дослідження з використанням програми ANSYS, та застосовуються її інструменти для отримання числових і візуальних результатів. Крім того, в роботі розглядаються деякі особливі випадки деформації, які були знайдені під час дослідження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АКУСТИЧНИЙ РЕЗОНАНС, КОМП’ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ANSYS, КОЛИВАННЯ

ABSTRACT

Hryhorenko Tymofii, *"Research and Computer Modeling of Acoustic Resonance"* Master's qualification thesis in Applied Physics. – Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University, 2024. – 28 pages.

The study explores the implementation of computer modeling of acoustic resonance, analyzing its features and areas of application. The first stage involves familiarization with the theoretical foundation of acoustic resonance and the methods of computer modeling for this process. Subsequently, a theoretical model with calculated parameters is examined and used for comparative analysis. Further, the research employs the ANSYS software and its tools to obtain numerical and visual results. Additionally, the study investigates specific cases of deformation observed during the research process.

KEYWORDS: ACOUSTIC RESONANCE, COMPUTER MODELING, ANSYS, VIBRATION

ЗМІСТ

ВСТУП …… 7
1.ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ……... 9
1.1 Аналіз літературних джерел ……9
1.2 Теоретичні відомості акустичного резонансу …….. 10
1.3 Комп’ютерне моделювання акустичного резонансу ……... 14
2. ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ …… 15
2.1 Огляд теоретичної моделі …….. 15
2.2 Теоретичні результати загальної моделі акустичного резонансу …….. 16
3. КОМП’ЮТЕРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ……. 18
3.1 Опис моделі досліджуваного об’єкта ……... 18
3.2 Результати …… 20
3.3 Додаткові дослідження …….. 24
ВИСНОВКИ …….. 27
СПИСОК ДЖКРКЛ …….. 28

ВСТУП

Актуальність теми. В XX столітті інженери та архітектори почали стикатися з незвичайною проблемою: деякі машини, кораблі, мости та будівлі пошкоджувалися, або руйнувалися без видимих на то причин. Одним з таких випадків був міст Такома Нарроуз, який обвалився через чотири місяці після відкриття, а причиною цього були неврахована можливість резонансних явищ. В наш час резонансні явища враховуються при проєктуванні всіх будівель, транспорту, технічних споруд (мостів, колій, промислових димарів) і більшість з потрібних розрахунків проводяться за допомогою комп'ютерних симуляцій, досліджень та розрахунків. На даний момент майже кожна CAD програма має в собі модулі для розрахунку резонансних явищ різної природи.
Серед них виділяється одночасно найперспективніший і найнебезпечніший: акустичний резонанс. Сам по собі акустичний резонанс може причинити обвал будинку чи мосту, критичні пошкодження в рухомих і нерухомих частинах транспортних засобів чи інших видів техніки, як помпи та насоси, в той час як акустичне забруднення в містах з його хаотичним темпом життя може спричинити дискомфорт, головні болі, або навіть повільну втрату слуху.
Однак акустичний резонанс також можна використовувати для своїх цілей. Одним із нових напрямів медицини є акустична медицина, яка починалася як дослідження впливу музики на здоров'я людини та розвилася до акустичного виявлення дефектів, яке називається УЗД та починається практика резонансного «розчинення» пухлин та інших захворювань, що потребують хірургічного втручання. Акустичний резонанс використовують і в матеріалознавстві для діагностики дефектів в матеріалі, в технологіях сонару для дослідження морського дна або на військових суднах.

Від чого дослідження акустичного резонансу та пошук можливих способів його використання є одним із важливих питань в сучасній техніці, архітектурі, медицині та науці.

Об’єкт дослідження – комп’ютерне моделювання акустичного резонансу

Предмет дослідження – огляд методу комп’ютерного моделювання акустичного резонансу

Методи дослідження – програма ANSYS та теоретичні дані

Наукова новизна одержаних результатів – порівняння теоретичних результатів з результатами, наданими програмою симуляції.

Практичне значення отриманих результатів – отримані результати нададуть можливість оцінити точність комп’ютерного дослідження та визначити недоліки теоретичної моделі.

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 25 сторінки, із них основного тексту 14 сторінок, 8 рисунків за текстом, список використаних джерел із 17 найменувань на 1 сторінку.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Аналіз літературних джкркл

Акустичний резонанс виникає, коли частота зовнішнього впливу збігається з однією з власних частот системи, що спричиняє підсилення амплітуди звукових хвиль [4]. Це явище є важливим для підсилення звуку в конкретних частотних діапазонах, що використовуються для фільтрації звукових хвиль і зменшення шуму, зокрема в резонаторах Гельмгольца [1]. Резонанс дозволяє акустичним системам вибірково підсилювати потрібні частоти, одночасно пригнічуючи інші, що має практичне значення для створення високочутливих пристроїв, таких як сенсори та фільтри [6].

Резонанс у замкнених просторах виникає внаслідок взаємодії хвиль, що відбиваються від меж середовища, утворюючи стоячі хвилі [9]. В системах з акустичним резонансом максимальна ефективність досягається, коли частота коливань системи відповідає її власній резонансній частоті, що дозволяє максимізувати енергетичну ефективність [5]. П’єзорезистивні сенсори, що базуються на принципах низькочастотного резонансу, демонструють високу чутливість і точність, що робить їх незамінними в медичних додатках для моніторингу стану здоров’я [7].

Саморезонанс повітряних котушок має схожі властивості до акустичних резонаторів, що дозволяє їх застосовувати в складних електромагнітних системах [3]. Акустичні резонатори широко використовуються в архітектурній акустиці для оптимізації реверберації, а також у технологіях обробки звукових хвиль, що дозволяє покращувати якість звуку в приміщеннях [5]. Точне налаштування частот резонаторів є ключем до створення високопродуктивних сенсорів і хвильових фільтрів, здатних працювати на найвищому рівні ефективності [8].

Загалом, резонанс забезпечує ефективну передачу енергії звукових хвиль, перетворюючи її на механічну чи електричну енергію в залежності від потреб системи, що робить резонанс незамінним елементом в сучасних технологіях [2]. Явище резонансу дозволяє створювати системи з високою точністю та ефективністю, що є важливими в широкому спектрі сучасних технічних застосувань [10].

Акустичний резонанс є важливим чинником у проектуванні вітрових турбін, де моделювання акустичних хвиль дозволяє враховувати резонансні

частоти турбін і їх вплив на навколишнє середовище. Це важливо для зменшення рівня шуму та покращення умов життя в районах, де встановлюються такі турбіни. Для цього використовуються методи моделювання, які допомагають зменшити шумове забруднення, що має прямий вплив на здоров'я людей, зокрема у тих зонах, де турбіни працюють на повну потужність [12].

Також, акустичні емісії використовуються для вивчення резонансних ефектів у різних матеріалах. Моделювання таких явищ дозволяє точно локалізувати джерела шуму та оцінити резонансні ефекти в конструкціях, що допомагає покращити точність у визначенні механізмів втоми та тріщиноутворення в матеріалах. Графове моделювання, яке використовується для дослідження акустичних емісій, допомагає виявити місця виникнення акустичних резонансів навіть у складних системах, підвищуючи ефективність моніторингу та діагностики [14].

Застосування теорії акустичних емісій разом з методами зелених функцій дає змогу більш точно прогнозувати резонансні частоти в напівпросторах, що важливо для акустичного аналізу та проектування акустичних систем. Це особливо корисно для моделювання взаємодії акустичних хвиль з матеріалами, а також для вдосконалення технологій, що враховують акустичні резонанси в різних умовах навколишнього середовища [16].

Крім того, моделювання акустичних резонансів має важливе значення для зниження негативного впливу шуму в населених районах, що дозволяє проектувати ефективніші системи шумозахисту та поліпшити акустичне середовище в таких зонах [13].

1.2 Теоретичні відомомсті акустичного резонанс

Акустичний резонанс – явище, при якому система підсилює свої власні звукові хвилі, що відповідають резонансним частотам. Його можна розглядати не лише в межах струни чи повітряних колон, але і в багатьох інших системах, зокрема в рідинах, твердих тілах та комплексних середовищах. . У рідинах резонансні явища спостерігаються, наприклад, у сферичних кавітаційних бульбашках під впливом ультразвукових хвиль, що використовується в медицині для руйнування каменів у нирках. У твердих тілах акустичний резонанс використовується в матеріалознавстві для визначення дефектів, де стоячі хвилі можуть відображати неоднорідності у структурі матеріалу. Але для простоти розгляду явища розглянемо його на моделі струни. Якщо збудити струну вдаривши по ній, вона почне коливатися

і створювати звукові хвилі своєї резонансної частоти. Знайти частоту коливань струни можна за формулою:

$$f = \frac{n\upsilon}{2L}$$

, де L- довжина струни по її закріплених кінцях, n- ціле додатне число, υ- швидкість пересування хвилі по струні, яка залежить від сили натягу та одномірної густини струни, тобто від маси струни на одиницю довжини. Для повітряних труб або струни форма стоячих хвиль впливає на якість звуку, що є критично важливим для музичних інструментів. Наприклад, обертони додають звуку характерний тембр, формуючи унікальний «голос» інструменту.

$$\upsilon = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

Виконавши спрощення можна записати рівняння частоти коливань як:

$$f = \frac{n}{2}\sqrt{\frac{T}{mL}}$$

де f — частота коливань, n — номер моди, T — напруга в струні, m — маса на одиницю довжини, L — довжина струни. Частоту коливань при n=1 називають тоном або основною частотою коливань, а частоту коливань при n>1 називають обертоном. Це дозволяє зрозуміти, як зміни в параметрах системи, таких як напруга або маса на одиницю довжини, впливають на частоту коливань і, відповідно, на акустичні характеристики.

Для того, щоб отримати ці рівняння, варто почати з рівняння звукових хвиль, яке описує поширення акустичних коливань у середовищі. Загальне рівняння для одномірних хвиль має вигляд:

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = \upsilon^2 \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2}$$

де p(x,t) — акустичний тиск, υ— швидкість звуку в середовищі, x — координата в просторі, а t — час. Це рівняння описує, як звукові хвилі розповсюджуються по середовищу. Далі ми розділяємо просторову та часову частини функції p(x,t) на два окремі функціональні фактори, тобто:

$$\boldsymbol{p(x,t) = X(x)T(t)},$$

де X(x)— просторовий розподіл, а T(t)— часовий фактор. Підставивши це у рівняння хвиль, ми отримуємо два окремих рівняння — одне для часу, а інше для простору:

$$X(x)\ \frac{d^2T(t)}{dt^2} = \upsilon^2 T(t)\ \frac{d^2X(x)}{dx^2}$$

Ділимо обидві частини на $X(x)T(t)$:

$$\frac{1}{T(t)}\frac{d^2T(t)}{dt^2} = \frac{\upsilon^2}{X(x)}\ \frac{d^2X(x)}{dx^2} = -\omega^2$$

Звідси отримуємо два рівняння: для часу і для простору.

$$T(t) = Acos(\omega t) + Bsin(\omega t)$$

$$X(x) = Ccos\left(\frac{\omega}{\upsilon}x\right) + Dsin\left(\frac{\omega}{\upsilon}x\right)$$

Для струни маємо випадок двох закріплених кінців, тому звуковий тиск p не змінюється на кінцях струни. Тобто при x = 0 та x = L, $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$. Це означає, що на кінцях струни звукові хвилі не можуть вільно проходити, і відповідно, в цих точках струна знаходиться в нерухомому стані. Підставимо це в рівняння для простору:

При x = 0:

$$\frac{dX(x)}{dx} = D\frac{\omega}{\upsilon} = 0\ \rightarrow D = 0;$$

При x = L:

$$\frac{dX(x)}{dx} = -C\frac{\omega}{\upsilon}\sin\left(\frac{\omega}{\upsilon}L\right) = 0 \rightarrow C \neq 0 \rightarrow \frac{\omega}{\upsilon}L = n\pi$$

$$\omega = \frac{n\pi\upsilon}{L} \rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{n\upsilon}{2L}$$

Це рівняння дає частоту основної моди (n=1n = 1n=1) та її гармоніки при n>1n > 1n>1. Розгляд таких гармонік дозволяє точніше налаштувати акустичні системи на потрібну частоту.

Також можливий випадок однієї закріпленої сторони, наприклад в циліндрах органу, або всіх духових інструментах. В такому випадку маємо формулу виглядом $f = \frac{(2n-1)\upsilon}{4L}$, тобто різниця між двома закріпленими кінцями й одним практично виглядає як відсутність у другого випадку парних обертонів, тобто звук не може передаватись з нерухомою точкою в центрі довжини струни. Розглянемо випадок з трубою, відкритою з одного боку більш детально.

Припустимо, що у нас є труба довжиною 0.5 м, швидкість звуку в повітрі 343 і стоїть задача знайти першу резонансну частоту f.

$$f = \frac{343}{4 * 0.5} = 171.5\text{Гц}$$

Вирішимо рівняння простору для цього випадку.

$$X(x) = Ccos\left(\frac{\omega}{\upsilon}x\right) + Dsin\left(\frac{\omega}{\upsilon}x\right)$$

$$\omega = \frac{n\pi v}{L} = \frac{1 * \pi * 343}{0.5} = 2155\text{Гц}$$
$$X(0) = Ccos(0) + Dsin(0) = C$$
$$X(0.5) = Ccos\left(\frac{343}{2}\right) + Dsin\left(\frac{343}{2}\right)$$

Для диску матимемо формулу:

$$f = \frac{k}{2\pi}\sqrt{\frac{D}{\rho h}}$$

В експериментальних умовах резонансні частоти можуть відрізнятися від теоретичних через технологічні похибки, зокрема невідповідність геометричних параметрів, вплив матеріальних властивостей, таких як неоднорідності, дефекти чи мікроструктура, а також через умови середовища, наприклад, температуру, вологість або тиск, які впливають на пружність і густину матеріалів. Для усунення цих відхилень використовують емпіричні коефіцієнти, які масштабують теоретичні результати. Наприклад, для резонансних частот диска можна ввести коефіцієнт корекції C, який дозволяє визначити експериментальні частоти за формулою $\boldsymbol{f}_{\text{експ}} = \boldsymbol{C} * \boldsymbol{f}_{\text{теор}}$ де C визначається за допомогою експериментальних даних.

Стоячі хвилі формуються в середовищах із чіткими границями, таких як струна, труба чи диск. Їх якість і форма залежать від граничних умов. У струнах дві закріплені точки створюють парні й непарні обертони. У трубах з одним відкритим кінцем лише непарні гармоніки формують звук, створюючи характерний тембр. У дисках хвилі можуть утворювати складні візерунки (моди), які відповідають різним резонансним частотам. Для дисків кожна резонансна мода описується коефіцієнтом $\boldsymbol{k_n}$, залежним від форми, кріплення та властивостей матеріалу.

На основі розрахунків і аналізу отримуються формули для основних систем. Для диска формула резонансної частоти виглядає як $f = \frac{k}{2\pi}\sqrt{\frac{D}{\boldsymbol{\rho h}}}$, де k залежить від граничних умов, D – модуль жорсткості, ρ – густина матеріалу, а h – товщина диска. Ці формули дозволяють розрахувати резонансні частоти для різних фізичних систем і уточнюються за допомогою експериментальних даних.

1.3 **Комп’ютерне моделювання акустичного резонансу**

Для комп’ютерного моделювання акустичних процесів буде використана програма ANSYS Student, однак для цього також можуть підійти й інші програми фірм MATLAB та FlowVision. В цих програмах є влаштований пакет для дослідження акустичного тиску всередині тіла або системи. Алгоритм моделювання акустичного резонансу зазвичай включає кілька послідовних етапів, кожен з яких виконується програмою для точного відтворення акустичних процесів.

Першим етапом є створення геометрії моделі об'єкта або середовища, в якому буде здійснюватися акустичне моделювання. Це може бути будь-яка структура, наприклад, труба, приміщення чи механічна деталь, що зазнає впливу звукових хвиль. Після цього виконується розбиття цієї геометрії на елементи сітки — процес, відомий як дискретизація, що дозволяє розв’язувати складні рівняння акустики на числових значеннях. Якість моделювання значною мірою залежить від розміру та точності сітки, адже чим дрібніші елементи, тим точніше буде результат, але й більше обчислювальних ресурсів потребує модель.

Другим етапом є визначення фізичних властивостей матеріалів, з яких складається модель. Для акустичних процесів важливо вказати параметри, що впливають на поведінку хвиль, такі як щільність матеріалу, швидкість звуку в ньому, коефіцієнт поглинання та відбивання звукових хвиль. Ці властивості суттєво впливають на поширення та резонансні характеристики хвиль у матеріалі чи середовищі. Після цього задаються граничні умови для моделювання звукових хвиль: визначаються джерела звуку, такі як динаміки або акустичні коливання, а також умови на межах моделі, наприклад, відображення чи поглинання хвиль на стінках або поверхнях. Важливо правильно налаштувати вхідні параметри, щоб симуляція адекватно відображала реальні умови.

Далі програма обчислює розподіл звукових хвиль в середовищі, враховуючи їх взаємодію з об'єктами. Для цього використовуються математичні моделі, такі як рівняння Нав'є-Стокса для руху середовища та хвильові рівняння для опису поширення акустичних хвиль. В процесі симуляції програма здійснює чисельне інтегрування рівнянь та обчислює акустичний тиск у різних точках моделі, враховуючи ефекти резонансу — коли частота звукових хвиль співпадає з природною частотою системи, що може призвести до значного збільшення амплітуди коливань.

Наступним етапом є аналіз результатів симуляції, на якому проводиться вивчення спектрів акустичних частот та їх вплив на систему. Програма дозволяє визначити резонансні частоти, де система здатна демонструвати найбільше посилення хвиль. Важливим аспектом є візуалізація результатів: побудова графіків, контурних карт, 3D-моделей, що дозволяють детально проаналізувати, як хвилі поширюються в середовищі і які частоти спричиняють найбільші коливання.

Завершальним етапом є коригування параметрів моделі, якщо результати симуляції не відповідають очікуваним або якщо потрібна оптимізація конструкції для покращення акустичних характеристик, таких як зменшення рівня шуму або досягнення необхідної гучності на певних частотах. Ці дані можуть бути використані для вдосконалення дизайну об'єктів або для підвищення ефективності акустичних систем.

2. ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ

2.1. Огряд теоретичної модклі

Для полегшення проведення розрахунків та симуляції буде використана модель диску зі сталі, в якому розповсюджуються акустичні хвилі. Цей підхід дозволяє ефективно моделювати процеси акустичного резонансу та визначати вплив матеріальних та геометричних властивостей диску на його акустичні характеристики. Оскільки акустичний резонанс виникає, коли частота зовнішнього сигналу збігається з природною частотою коливань системи, важливим завданням є розрахунок цієї природної частоти для різних параметрів моделі.

Для опису акустичного резонансу в диску будемо використовувати формулу:

$$f = \frac{k}{2\pi}\sqrt{\frac{D}{\boldsymbol{\rho h}}}$$

де f — резонансна частота, k — коефіцієнт, який залежить від геометричних характеристик диска, D — модуль пружності матеріалу (для сталі він визначений експериментально), ρ — густина матеріалу, а h — товщина диска.

У нашому випадку коефіцієнт k буде дорівнювати R, де R —множина цілих чисел. Використовуючи цю формулу, можна здійснити серію розрахунків для різних значень параметрів, таких як товщина, матеріал або розмір диска, що допоможе виявити, при яких умовах виникають найсильніші резонансні коливання.

В рамках теоретичного дослідження буде проведено 10 розрахунків, що дозволить отримати спектр частот Розширене теоретичне дослідження передбачає також оцінку впливу різних типів матеріалів на характеристики акустичних коливань. Наприклад, зміна матеріалу може змінити величину модуля пружності D та густину ρ, що, в свою чергу, змінить резонансну частоту. Це дослідження дозволить зібрати інформацію, яка допоможе в подальших етапах симуляцій та оптимізації акустичних властивостей дискових систем.

Також важливо провести аналіз впливу розмірів та форми диска на розподіл акустичних хвиль та їх взаємодію з іншими об'єктами в системі. Моделювання цього процесу дозволить точно передбачити, як звукові хвилі поширюються в різних умовах, а також як оптимізувати конструкцію для досягнення бажаного акустичного ефекту, будь то зменшення рівня шуму або підвищення чутливості системи до певних частот.

Однак в нашому випадку теоретичні розрахунки будуть спрощені.

2.2 Теоретичні результати загальної моделі акустичного резонансу

Щоб оцінити першу резонансну частоту (або основну власну частоту) диска, потрібно знати його механічні властивості та використовувати теоретичні формули, що описують вібрації круглих пластин.

Початкові дані:

- Діаметр d = 10 см $\Longrightarrow$ R = 5 см = 0.05 м d=10см⟹R=5см=0.05м,
- Товщина h = 0.8 мм = 0.0008 м h=0.8мм=0.0008м.
- Матеріал: Сталь ($E = 2 \cdot 1\ 0\ 11$ Па E=2·10 11 Па, ν = 0.3 ν=0.3, ρ = 7850 кг/м 3 ρ=7850кг/м 3).

Для граничних умов із жорстким закріпленням краю $k \approx 10.215$. Наступні резонансні частоти круглої пластини визначаються вищими власними модами, кожна з яких має свій власний коефіцієнт k. Ці коефіцієнти залежать від граничних умов та моди коливань. Для круглої пластини з жорстко закріпленими краями перші кілька значень knk_nkn для резонансних мод виглядають так:

1. Основна мода: k1=10.215
2. Друга мода: k2=21.213
3. Третя мода: k3=26.379
4. Четверта мода: k4=33.221
5. П'ята мода: k5=39.766

Ці значення дозволяють розрахувати резонансні частоти для кожної з мод, використовуючи відповідні формули для визначення частоти коливань. Використовуючи ці коефіцієнти та параметри матеріалу, ми можемо розрахувати частоти для перших 10 мод вібрацій круглої пластини. Отримані частоти виглядають наступним чином:

1	794.65 Гц	6	3591.30 Гц
2	1650.22 Гц	7	4083.50 Гц
3	2052.09 Гц	8	4573.20 Гц
4	2584.35 Гц	9	5061.89 Гц
5	3093.51 Гц	10	5550.28 Гц

Ці частоти відображають різні резонансні моди пластини, що коливається. Перша частота — основна — є найважливішою для оцінки акустичних властивостей матеріалу, адже вона зазвичай є тією, на якій найбільш активно відбувається коливання при впливі зовнішнього акустичного сигналу. Інші частоти, що є вищими обертонами, мають менший вплив, але також можуть бути важливими при налаштуванні акустичних систем.

3. КОМП'ЮТЕРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Опис моделі досліджуваного об'єкта

Досліджуваним об'єктом є суцільний металевий диск діаметром 10 см і товщиною 0.8 мм, виготовлений із сталі, що забезпечує необхідні механічні та акустичні характеристики для проведення вібраційних досліджень. Цей диск був спроєктований з використанням потужних інструментів, доступних у програмі ANSYS, яка дозволяє створити високоточну 3D модель об'єкта з урахуванням усіх геометричних та матеріальних параметрів. Це дає змогу точно передбачити, як диск буде реагувати на акустичні коливання та вплив зовнішніх навантажень.

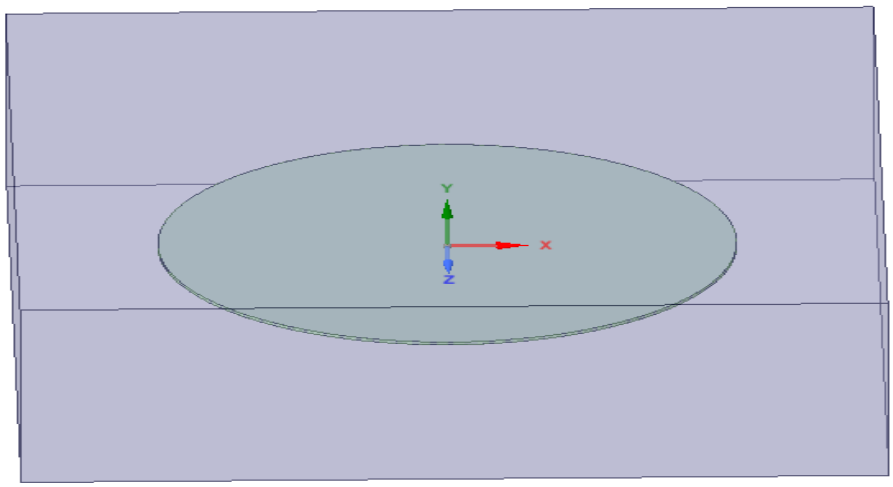


Рисунок 1 Дисе, створений за допомогою програми ANSYS

Після побудови 3D моделі диска буде використано декілька методів чисельного моделювання для оцінки його резонансних властивостей. Зокрема, будуть застосовані моделі Modal, Harmonic Response та Harmonic Acoustics, кожна з яких виконує певну роль у вивченні вібраційних процесів. Модель

Modal дозволяє визначити основні моди коливань та їх частоти, а також виявити, які з них є найбільш вираженими при певних умовах навантаження. Модель Harmonic Response дає можливість розрахувати реакцію об'єкта на гармонійне навантаження, що важливо для оцінки ефективності роботи акустичних систем або для прогнозування можливих руйнувань від надмірних вібрацій. Модель Harmonic Acoustics, в свою чергу, дозволяє поєднати вібраційні властивості матеріалу з акустичними хвилями, що дає змогу більш детально аналізувати вплив звукового тиску на структуру диска та його можливу деформацію.

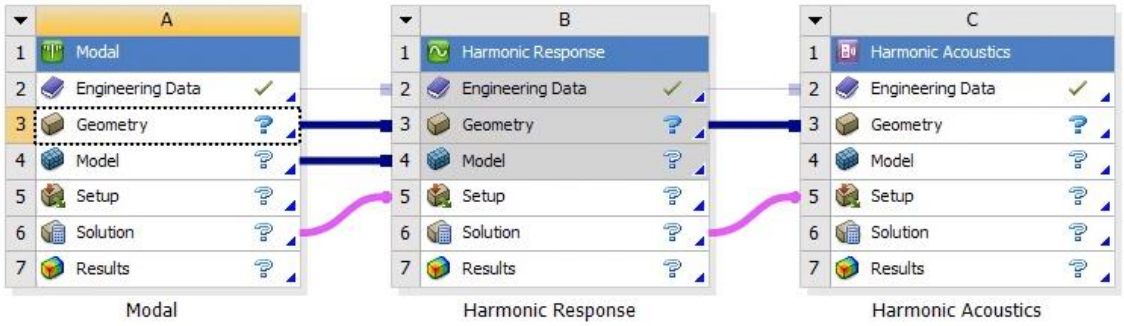


Рисунок 2 Вигляд схеми проєкту дослідження

Після розрахунків будуть отримані точні значення резонансних частот, що є важливими для подальшої оцінки акустичних характеристик диска. Окрім цього, за допомогою візуалізації в програмі ANSYS буде змодельовано деформацію диска під впливом акустичного навантаження, що дасть змогу краще зрозуміти механізми виникнення резонансу та його вплив на матеріал. Завдяки цим дослідженням можна буде не тільки виявити найбільш критичні частоти, але й оптимізувати конструкцію для зменшення негативного впливу вібрацій, що важливо для розробки більш ефективних акустичних систем.

3.2. Результати

Перша резонансна частота для пластикового диску була 754,33 Гц, у той час як теоретичні розрахунки за формулою дали результат 794,65 Гц, що є

досить близькими результатами, до того ж теоретичні розрахунки проводилися за спрощеними рівняннями.
Деформація, яку зазнавав диск за першої резонансної частоти має вигляд «миски», яка коливається вниз і вгору центром диску.

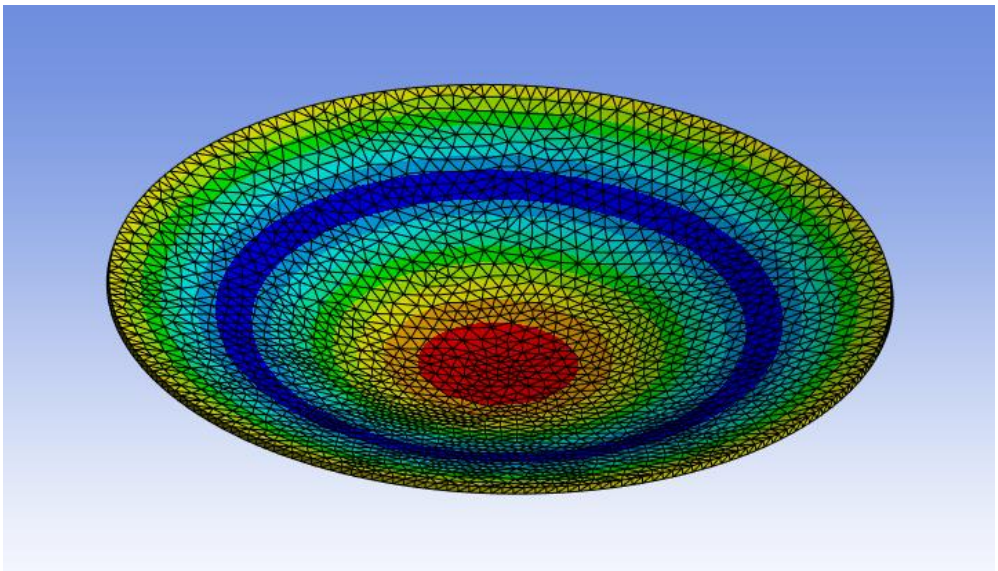


Рисунок 3 Досліджуваний диск за частоти 754,33 Гц

1	754,33 Гц	6	3658,9 Гц
2	1696,9 Гц	7	4352 Гц
3	2748,6 Гц	8	4984,7 Гц
4	2715,6 Гц	9	5351,3 Гц
5	3171,7 Гц	10	5981,5 Гц

Окремо варто виділити деякі цікаві випадки деформацій, що були помічені під час дослідження, оскільки вони демонструють унікальні особливості поведінки диска на різних резонансних частотах.

Перший приклад – це деформація при частоті 1696,9 Гц. На цій частоті край диска коливався у формі синусоїди, тоді як центральна частина залишалася майже нерухомою. Це явище супроводжувалося появою чотирьох осей симетрії, які візуально поділяли диск на рівні сектори.

Другий та третій приклади стосуються частот 6569 Гц та 13734 Гц. Ці коливання виглядали схожими, але мали суттєву різницю – зсув фази на 90°.

Обидва випадки також демонстрували чотири осі симетрії, але характер зміщення країв диска створював відчуття "зсуву" хвильового малюнка, що підсилювало враження динамічності.

Четвертий приклад – це поведінка диска на частоті 15442 Гц. Ця деформація відрізнялася від попередніх, оскільки мала лише дві осі симетрії. Геометрія коливань нагадувала половину фази попередніх двох прикладів, але з помітно більшим напруженням на краях.

Нарешті, п’ятий і найбільш цікавий випадок стосується високочастотних коливань, близьких до ультразвукового діапазону. На цій частоті поверхня диска виглядала так, ніби крапля води впала в спокійне озеро. Ця картина супроводжувалася появою лише двох осей симетрії, що додавало структурі коливань особливого ефекту хвильового розриву.

Такі унікальні приклади підкреслюють складність поведінки резонансних коливань і відкривають можливості для детальнішого аналізу впливу зовнішніх частот на матеріал. Кожен із цих випадків не тільки допомагає краще зрозуміти природу акустичного резонансу, а й може бути корисним для практичного використання у проектуванні акустичних систем або механічних конструкцій.

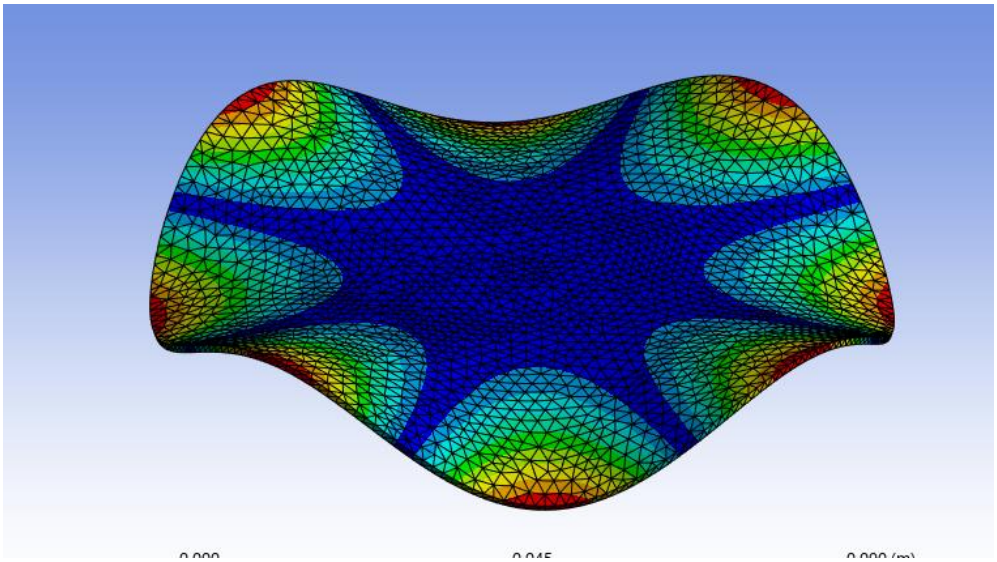


Рисунок 4 Досліджуваний диск при 1696,9 Гц

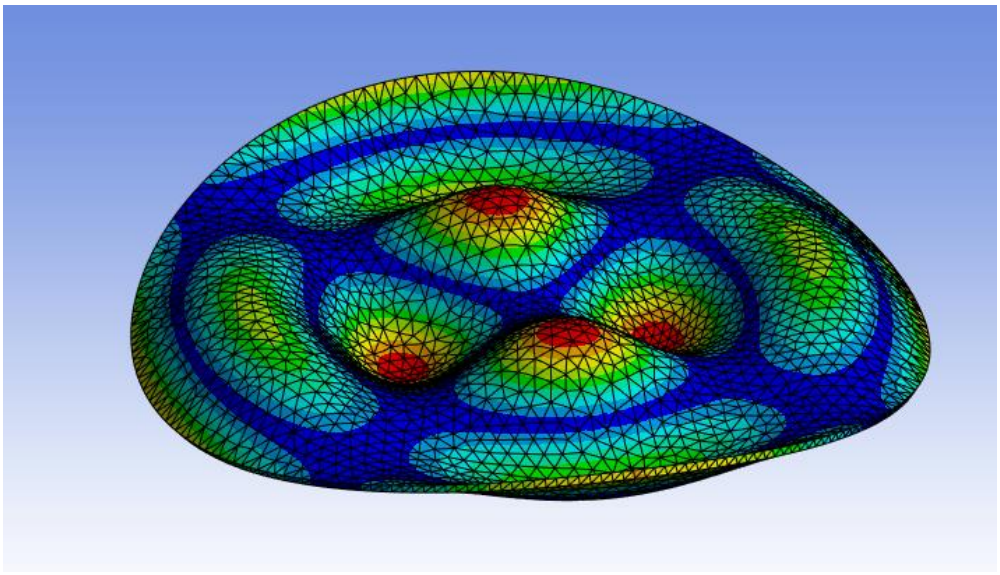


Рисунок 5 Досліджуваний диск при 6569 Гц

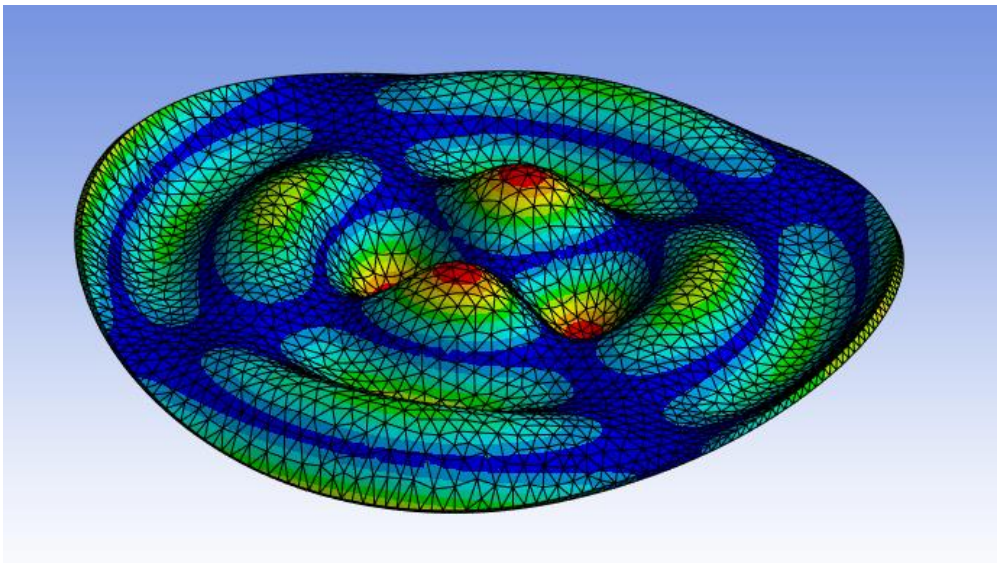


Рисунок 6 Досліджуваний диск при 13734 Гц

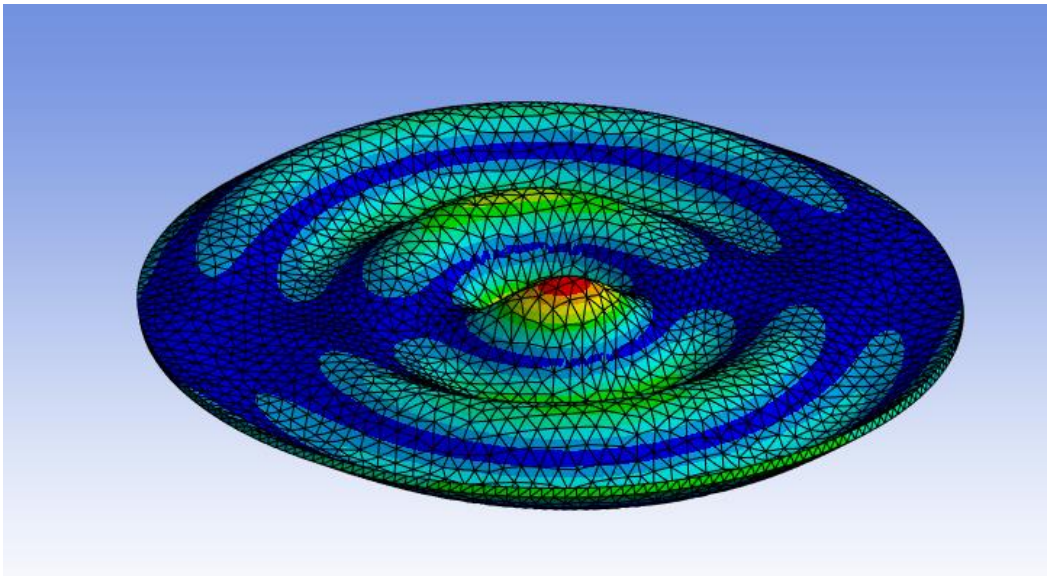


Рисунок 7 Досліджуваний диск при 15442 Гц

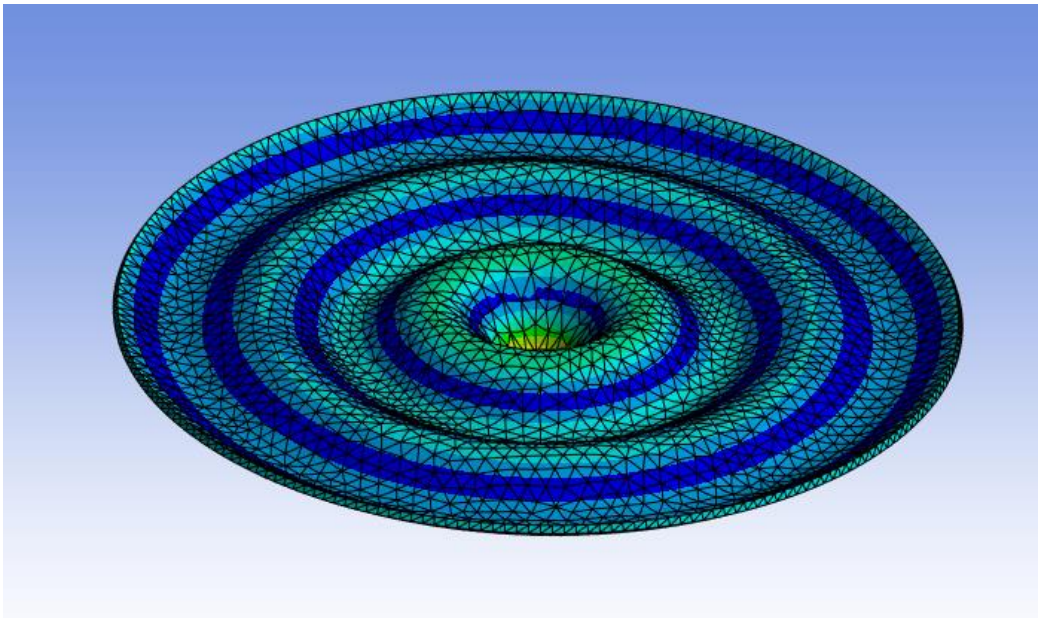


Рисунок 8 Досліджуваний диск при 19187 Гц

3.3 Додаткові дослідження.

Для закріплення результатів одного дослідження, проведемо дослідження з іншим тілом, наприклад стальним стрижнем довжиною 20 см і діаметром 7,5 мм.

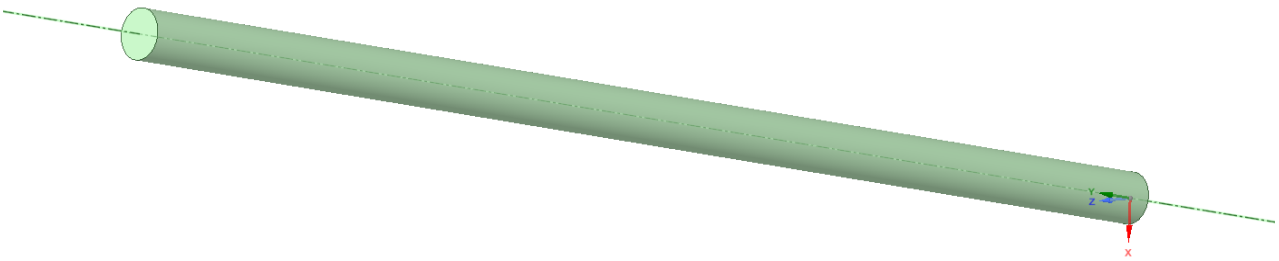


Рисунок 9 Досліджуваний стрижень

Використовуючи формули, що записані в розділі 1.2, результатом теоретичних розрахунків в діапазоні 0-20000 Гц була лише одна частота: 12500 Гц. В свою чергу результати симуляції показали , що резонансна частота для акустичного резонансу в стрижні є 12618 Гц.

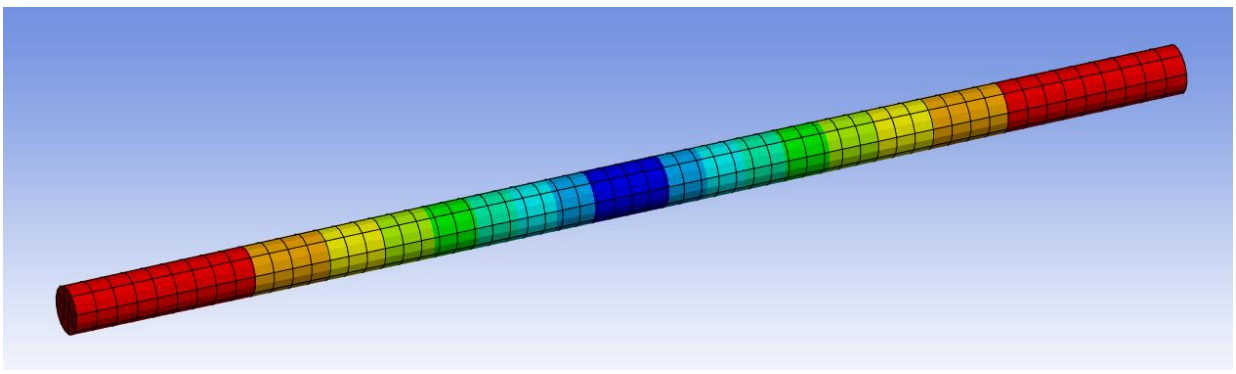


Рисунок 10 Стальний стрижень при коливаннях акустичних хвись 12618 Гц

За цієї частоти стрижень змінює свою довжину в діапазоні ±34 мм від номіналу. Помітно, що стрижень має один обертон в центрі стрижня.

Наступною резонансною частотою була надзвукова частота 25000 Гц. Розрахунки, проведені за допомогою моделювання показали, що резонансна

частота: 25230 Гц. За цієї частоти на стрижні явно видно два обертони з деформацією розтягування ±52 мм.

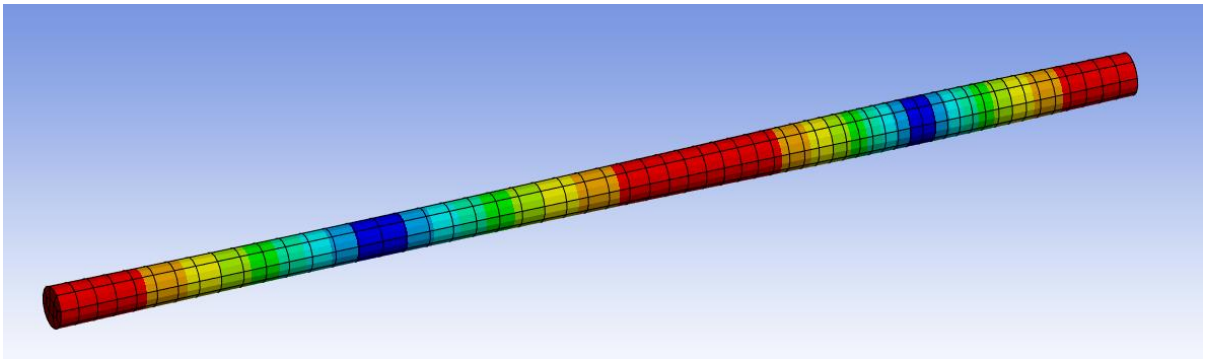


Рисунок 11 Стрижень за частоти 25230 Гц

У той час як за іншими резонансними частотами стрижень пластично деформується, згинаючись по синусоїді, або змінюючи товщину стрижня, частоти акустичного резонансу викликають деформацію розтягування та стягування. Тож теоретичні розрахунки показали частоту акустичного резонансу 12500 Гц, а симуляція - 12618 Гц. Відхилення (~0.9%) може бути зумовлене припущеннями у теоретичних розрахунках, таких як ідеалізація геометрії, а також впливом реальних матеріальних властивостей стрижня (нелінійності, тертя, неоднорідність матеріалу). Для другої гармоніки: теоретична частота 25000 Гц, симуляційна - 25230 Гц. Відхилення (~0.92%) підтверджує високу точність моделі.

Акустичний резонанс на частоті 12618 Гц проявляється у вигляді одного обертона в центрі стрижня, а амплітуда деформації становить ±34 мм. Цей режим відповідає основній гармоніці, де стрижень рівномірно розтягується та стискається. На частоті 25230 Гц з'являються два обертони, що характерно для другої гармоніки, з більшою амплітудою деформації (±52 мм). Це свідчить про те, що з підвищенням гармоніки енергія коливань суттєво зростає.

Частоти акустичного резонансу викликають поздовжні коливання (розтягування та стискання), що відрізняє їх від інших можливих режимів, таких як згинальні чи обертальні коливання. Геометрія стрижня значно впливає на коливання: відношення довжини до діаметра створює умови, коли поздовжні хвилі домінують. Крім того, сталь як матеріал демонструє чітко виражені гармоніки завдяки високому модулю Юнга та щільності.

Значна амплітуда деформації (±34мм і ±52мм) свідчить про ефективну передачу енергії коливань у стрижні при резонансі. Це відкриває можливості для практичного застосування таких досліджень, зокрема в ультразвукових технологіях, де важлива стабільна передача механічних хвиль. Рекомендується порівняти отримані результати з експериментальними даними для уточнення відхилень, а також дослідити згинальні режими, щоб повніше зрозуміти поведінку стрижня. Додатково, варто вивчити вплив зміни геометрії (довжина, діаметр) і матеріальних властивостей на резонансні частоти для їх оптимізації у майбутніх розробках.

ВИСНОВКИ

Використання програмного забезпечення ANSYS для моделювання акустичного резонансу дозволило отримати результати, які досить близькі до попередніх теоретичних розрахунків. Це підтверджує ефективність чисельних методів у вивченні вібраційних явищ.

Спостереження за деформаціями диска показали унікальні форми хвильових малюнків на різних частотах. Ці малюнки, такі як "миска", "синусоїдальні хвилі" або "ефект краплі води", вказують на складну динаміку резонансних коливань і можуть бути корисними для діагностики матеріалів та оптимізації конструкцій.

Результати дослідження можуть бути застосовані в проєктуванні систем, де акустичний резонанс відіграє критичну роль. Це включає розробку конструкцій, стійких до вібрацій, акустичних сенсорів, а також інших пристроїв, що використовують резонансні явища.

Відмінності між теоретичними та експериментальними результатами вказують на вплив додаткових факторів, таких як неоднорідність матеріалу, температурні зміни або інші умови навколишнього середовища. Це підкреслює важливість врахування цих факторів у моделюванні.

Дослідження поглибило розуміння акустичного резонансу у твердих тілах. Результати можуть виступати базою для подальших наукових робіт, спрямованих на оптимізацію матеріалів, вдосконалення технологій ультразвукової діагностики та розробку нових методів обробки звуку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators // J.Acoust. Soc. Am. – 1953. – V. 25. – No6.
2. Crandall I. B. Theory of vibrating system and sound. – N. Y.: bell telephone laboratories, 1927.
3. Self-resonant frequencies of air-core single-layer solenoid coils calculated by a simple method | Electrical Engineering
4. Акустичний резонанс — Вікіпедія
5. Acoustic resonance - Wikipedia
6. Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V., "Fundamentals of Acoustics", 3rd Edition, ISBN 978-0-471-02933-5, Wiley, New York, 1982.
7. Highly sensitive low-frequency-detectable acoustic sensor using a piezoresistive cantilever for health monitoring applications | Scientific Reports
8. Beranek L.L., Mellow T.J. "Acoustics: Sound Fields and Transducers".
9. Morse P.M., Ingard K.U. "Theoretical Acoustics".
10. Pierce A.D. "Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications" (Journal of Applied Physics).
11. Morse P.M. "Resonance in Acoustic Systems" (Journal of the Acoustical Society of America)
12. Pedersen, E. and Waye, K.P., Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments, Occupational and Environmental Medicine, 2007.
13. Pedersen, E. Effects of wind turbines of humans, Third Internation Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg Denmark 17-19 June 2009.
14. Mu, W.; Zou, Z.; Sun, H. Research on the time difference of arrival location method of an acoustic emission source based on visible graph modelling. Insight 2018
15. McBride, S.; MacLachlan, J.; Paradis, B. Acoustic emission and inclusion fracture in 7075 aluminum alloys. J. Nondestruct. Eval. 1981
16. Ono, K.; Ohtsu, M. A generalized theory of AE and Green’s functions in a half space. J. AE 1984
17. Ohtsu, M.; Ono, K. The Generalized Theory and Source Representation of AE. J. AE 1986