

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

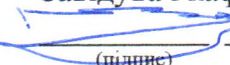
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра Акустичних та Мультимедійних Електронних систем

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 Найда С.А.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«01» червня 2020 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) _____ 171 Електроніка _____

(код та назва спеціальності)

на тему: «П'єзомікрофон» _____

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи ДГ-г61-1

(шифр групи)

Боголюбов Ігор Антонович

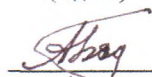
(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник доцент, к.т.н., Богданов Олексій Вікторович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Консультант _____

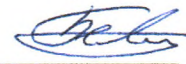
(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент ст.викладач кафедри ЕПС Бевза О. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент 

(підпис)

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

Інститут/факультет _____ електроніки _____
(повна назва)

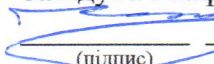
Кафедра _____ Акустичних та Мультимедійних Електронних систем _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація)) _____ 171 Електроніка _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 С.А. Найда
(підпис) (ініціали, прізвище)

«01» червня 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проект (роботу) студенту**

_____ Боголюбов Ігор Антонович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) П'єзомікрофон _____

керівник проекту (роботи) _____ Богданов Олексій Вікторович, доцент, к.т.н. ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 25 » травня 2020 р. № 1196-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 03.06.2020 _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) база даних, створена на основі експериментальних досліджень, обробка отриманих даних в яку входить знаходження первинних класифікаційних ознак та оцінка їх інформативності.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) і

1. Аналіз сучасного стану проблеми.

2. Організація експериментальних досліджень для збору даних.

3. Обробка отриманих даних. Результати досліджень.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація, креслення перетворювача, модель перетворювача у COMSOL

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір матеріалів для роботи. Аналіз науково-технічної літератури.	10.05.2020-18 .05.2020	
2	Обробка отриманих даних в яку входить знаходження первинних класифікаційних ознак та оцінка їх інформативності.	25.05-31.05.2020	
3	Оформлення пояснювальної записки	04.06.2020-05.06.2020	

Студент



(підпис)

І.А. Боголюбов

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)



(підпис)

О.В. Богданов

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (робот)

РЕФЕРАТ

П'єзомікрофон// Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр». Боголюбов І.А. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра акустики та акустoeлектроніки, група ДГ-гб1-1. – К.:НТУУ «КПІ», 2020. с. – , рис. – , табл. – 1

Метою проекту є створення базової інформації, про п'єзомікрофони для подальшого модернізування їх у навчальному процесі. Тому я опишу явище п'єзоефекту, на якому і «лежить» весь принцип роботи даного типу мікрофона . Перегляну сучасні види п'єзокераміки та продемонструю їх параметри (в тому числі параметри які відповідають за якість на міжнародному рівні). Проведу огляд різних типів розміщення п'єзокераміки (монопластина, біморф, пакет) з перевагами та недоліками, локально для кожного випадку.

Виконано експериментальні дослідження у програмному пакеті COMSOL Multiphysics 5.5, яка дозволила провести експеримент на візуальному рівні, що в подальшому знадобиться, що виконувати експеримент з реальними зразками.

Ключові слова: П'єзоефект, п'єзомікрофон, мікрофон, акустика.

ABSTRACT

Piezomicrophone // Thesis for a degree of higher education "Bachelor".

I.Boholiubov, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic

Institute named after Igor Sikorsky, Faculty of Electronics, Department of

acoustics and acoustoelectronics, group DG-g61-1. - K: NTUU "KPI", 2020. p. - ,
fig. - 70, tab. - 1.

The purpose of this research is to create basic information about piezomicrophones for further modernization in the educational process. Therefore, I will describe the phenomenon of the piezoelectric effect, on which the whole principle of operation of this type of microphone based. I will review modern types of piezoceramics and demonstrate their parameters (including parameters responsible for quality at the international level). I will review the different types of piezoceramics placement (monoplate, bimorph, package) with advantages and disadvantages, locally for each case.

Experimental studies were performed in the software package COMSOL Multiphysics 5.5, which allowed to conduct the experiment on a visual level, which in the future will be required to perform the experiment with real samples.

Keywords: Piezo effect, piezomicrophone, microphone, acoustics.

ЗМІСТ

Вступ.....	1
1.Огляд різних конструкцій мікрофонів.....	2
1.1Пояснення принципу перетворення різних мікрофонів.....	3
1.1.1.Вугільний мікрофон.....	3
1.1.2 Конденсаторний мікрофон.....	6
1.1.3 Електретний мікрофон.....	9
1.1.4 Динамічні мікрофони.....	12
1.1.5 П'єзоелектричний мікрофон.....	15
1.1.6 оптоакустичний мікрофон	17
1.2 Капсули мікрофонів.	19
1.2.1 Капсула закритого типу.....	19
1.2.2Капсула відкритого типу.....	20
2.П'єзоелектричний мікрофон	21
2.1Основні поняття про п'єзоелектричний ефект.....	21
2.1 Параметри якості сучасної кераміки.....	24
2.2 Огляд сучасної п'єзокераміки.....	25
2.2.1 PZT.....	25
2.2.2 Високотемпературна п'єзокераміка.....	28
2.3 Огляд різних варіантів конструкції п'єзокераміки.....	29
2.3.1 П'єзокерамічні актюатори.....	29
2.3.2 пкаетна конструкція.....	30
2.3.3 Багатошарові актюатори.....	31
2.3.4 Біморфна конструкція	34
3. Моделювання конструкції.....	35
3.1 Перелік деталей вим. стенду.....	35
3.2. Вибір матеріалів для кожного елемента стенду.....	35
3.3Фізичні параметри матеріалів стенду.....	36
3.4 Підготовка до розрахунків.....	37
3.5 Результати.....	38
Висновок	43
Література.....	44
Додаток 1	45
Додаток 2	46
Додаток 3	47
Додаток 4	48
Додаток 5.....	49

Вступ

В усі часи, вдосконалення вже винайдених речей займало велику роль у життєдіяльності людей. Мікрофони не є виключенням, особливо враховуючи їх невід'ємне для людини призначення вже протягом століття.

В даному дипломному проєкті я розгляну будову різних типів мікрофонів, їх принцип перетворення акустичної хвилі у корисний електричний сигнал, перегляну їх переваги та недоліки, приведу приклад застосування для кожного типу з поясненням.

Вид мікрофону, який використовує п'єзоефект для перетворення звуку в електро сигнал, так званий п'єзомікрофон, має вагому позицію на ринку. Перевага у малих розмірах не дає йому вийти з ужитку серед різних типів мікрофонів. (та іншої апаратури загалом, яку я також розгляну, як галузь використання)

Перший прототип був винайдений 100 років назад, але те що представлено на сучасному ринку, очевидно, суттєво відрізняється. Такий вид мікрофону, на сучасному етапі, виділяє його хоча б тому, що для поглинання звукової хвилі йому не потрібна мембрана. Сучасні матеріали, такі як PZT, дозволяють подавати звук прямо на поверхню п'єзокераміки.

Основна мета цієї роботи – створення базової інформації, про п'єзомікрофони для подальшого модернізування їх. Тому я опишу явище п'єзоефекту, на якому і «лежить» весь принцип. Перегляну сучасні види п'єзокераміки та продемонструю їх параметри (в тому числі параметри які відповідають за якість на міжнародному рівні). Проведу огляд різних типів розміщення п'єзокераміки (монопластина, біморф, пакет) з перевагами та недоліками, локально для кожного випадку.

Буде продемонстровано амплітудно-частотні характеристики матеріалу PZT-7A, навантаженого мембраною, для поповнення бази знань у подальшій модернізації вимірювального стенду. З цього експерименту побачимо, які нюанси треба враховувати для конструювання на початковому етапі дослідження. Зробимо висновки експерименту.

1.Огляд різних конструкцій мікрофонів

Визначення. Мікрофоном називають електричний прилад, який перетворює звукові коливання на коливання сили електричного струму. В багатьох електро-пристроях ми можемо бачити його, як невід'ємну частину конструкції: телефон (смартфон), магнітофон, прилад для звукозапису та відеозапису, радіо та телебачення, УЗ-контроль та вимірювання.

Класифікація. Розрізняють мікрофони за принципом їх перетворення акустичного коливання у електричний струм: вугільні, п'єзоелектричні, мікрофони магнітоелектричного типу (динамічні або стрічкові), конденсаторні (різновидом є електретний мікрофон). Найбільшу популярність на сьогоднішній день здобувають: динамічні, конденсаторні та електретні мікрофони.

Класифікувати мікрофони можна ще й за впливом акустичних (звукових) хвиль на діафрагму капсуля, такі як: приймач тиску, приймач градієнта тиску та комбіновані приймачі.

Область застосування. Зазвичай, електромагнітні та п'єзо-електричні мікрофони використовуються приладами звукопідсилення. Такі, як: слухові апарати, мегафони, прилади зв'язку, передача інформаційних повідомлень, об'яв, команд тощо. Тобто, такий тип мікрофонів ми використовуємо, коли питання стоїть у достатній розбірливості передаваної мови, а не у точній передачі тембру.

Технічні характеристики мікрофонів. Осьова чутливість, номінальний діапазон частот, нерівномірність частотної характеристики та вихідний опір – це основні технічні характеристики мікрофонів. Для правильної експлуатації мікрофонів, потрібно знати номінальний опір їх навантаження, рівень власних шумів і характеристику направленості. Остання, в основному, залежить від конструктивних особливостей капсуля мікрофона. [1]

1.1 Пояснення принципу перетворення різних видів мікрофонів

Принцип роботи мікрофонів різного типу

1.1.1 Вугільний мікрофон.

У 1856 році француз Дю Монсель (Du Moncel) опублікував результати своїх досліджень, з яких випливало, що графітові електроди мають здатність відповідати значною зміною електричного опору при невеликій зміні площі дотику провідників. Дана властивість стало основою для різних варіантів конструкцій мікрофонів.

Перший вугільний мікрофон побудував американський винахідник Еміль Берлінер 4 березня 1877 року. Однак, розвиток отримав мікрофон американського винахідника Девіда Юза (англ. David Hughes) в травні 1878 року.

Мікрофон Юза містив вугільний стрижень з загостреними кінцями, що впирався в дві вугільні ж чашечки, і з'єднаний з рухомою мембраною.

Площа контакту вугільного стрижня з чашечками сильно змінювалася при коливаннях мембрани, відповідно змінювалося і опір вугільного мікрофона, а з ним і струм в ланцюзі. Мікрофон Юза удосконалювався багатьма винахідниками. Графічне представлення конструкції мікрофону Юза зображено на рисунку 1.

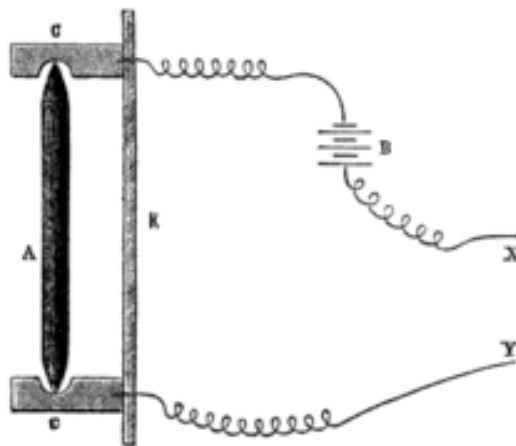


Рисунок 1. Мікрофон Юза

Вельми значно вдосконалив цей тип мікрофонів Едісон (зокрема, він запропонував використовувати вугільний порошок замість вугільного стрижня, тобто винайшов новий вид вугільного мікрофона з вугільним порошком). Автор найбільш вдалої конструкції вугільного мікрофона - Ентоні Уайт (1890).

Вугільний мікрофон - один з перших типів мікрофонів. Вугільний мікрофон містить вугільний порошок, розміщений між двома металевими пластинами і ув'язнений в герметичну капсулу. Стінки капсули або одна з металевих пластин з'єднується з мембраною.

При зміні тиску на вугільний порошок змінюється площа контакту між окремими зернятками вугілля, і, в результаті, змінюється опір між металевими пластинами. Якщо пропускати між пластинами постійний струм, напруга між пластинами буде залежати від тиску на мембрану. [13]

Принцип роботи вугільного (порошкового) мікрофону:

На рисунку 1.1 зображений вугільний мікрофон, де

- 1 - мембрана (або діафрагма), зазвичай виконана з тонкого металу;
- 2 - рухливий електрод (жорстко зчеплений з мембраною);
- 3 - вугільний порошок;
- 4 - корпус (діелектричний матеріал);
- 5 - нерухомий електрод;
- 6 - узгоджене навантаження R_n ;
- 7 - ЕРС, батарея.

Принцип роботи вугільного мікрофона ґрунтується на зміні опору вугільного порошку, де опір вугільного мікрофона залежить від наступних величин: струм живлення, тривалості проходження струму живлення, розмірів і форми зерен вугільного порошку, положення мікрофона в просторі, наприклад, кута нахилу.

За рахунок звукової хвилі (коливання) утворюється тиск на мембрану 1 (з огляду на те, що вона гнучка і пружна), яка призводить до коливального руху рухливий електрод 2 в результаті чого, вугільний порошок 3 починає то стискатися, то розтискати при цьому його опір або збільшується, або зменшується. У ланцюзі через нерухомий електрод 5 починає протікати пульсуючий струм (постійний струм і змінний струм) у вигляді форми синусоїди.

Таким чином, основна функція мікрофона - це перетворення звукового коливання в електричний, а також притаманними підсилювальними характеристиками і може посилювати сигнал в тисячі разів.

Опір вугільного мікрофона зазвичай становить 60-300 Ом, частота - 300-3000 Гц. Мікрофон чутливий до вологості, впливу грози. [14]

Формула для визначення миттєвого значення е.р.с. : $\varepsilon = IR_m \sin \omega_0 t$

R_m - амплітуда опору мікрофона (змінна величина).

Формула для знаходження електричної потужності P_m , яку віддає мікрофон узгодженому навантаженню R_n : $P_m = \frac{E_m^2}{4R_n}$. Якщо $R_n = R_m$ та

$E_m = \frac{I_0 R_m}{\sqrt{2}}$, то формула має вигляд: $P_m = \frac{I_0^2 R_m^2}{8R_m}$, де R_m - Середній опір мікрофону під час роботи [14]

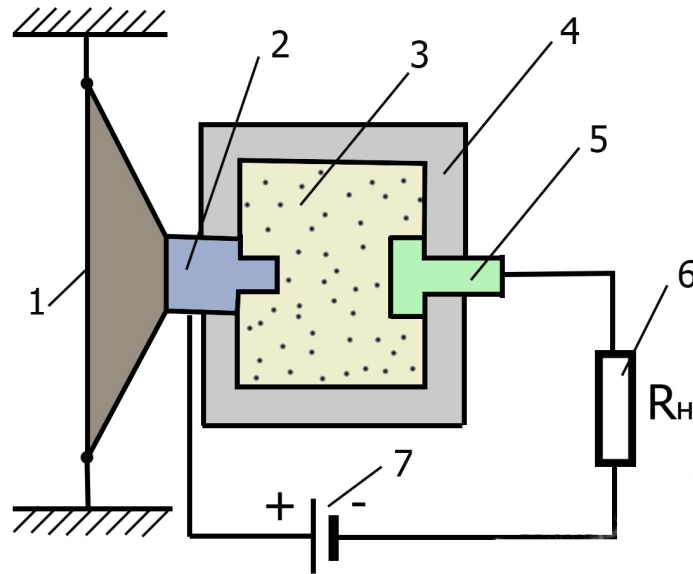


Рисунок 2. Вугільний (порошковий) мікрофон

Переваги: Вугільний мікрофон практично не вимагає посилення сигналу, сигнал з його виходу можна подавати безпосередньо на високоомний навушник або гучномовець.

Недоліки: Вугільний мікрофон відрізняється поганою амплітудно-частотною характеристикою і вузькою смугою пропускання (він нечутливий до занадто низьких і дуже високих частот), високим рівнем шумів і спотворень. Крім того, на відміну від найбільш поширеного динамічного мікрофона, вугільний вимагає живлення постійним струмом. [13]

Галузь застосування: Вугільні мікрофони використовувалися до недавнього часу в телефонних апаратах, їх використання звільняло телефонний апарат від дорогих і дефіцитних в той час напівпровідникових деталей або громіздких, тендітних і енергоємних підсилювачів на радіолампах.

Класичний телефонний апарат з дисковим номеронабирачем зазвичай містив вугільний мікрофон (проте в апаратах більш пізніх років випуску часто застосовуються динамічні або електретні мікрофони, часто об'єднані в єдину конструкцію з підсилювачем, взаємозамінну з вугільним мікрофоном).

Наприкінці XX століття з'явилися дешеві й доступні напівпровідникові підсилювачі, які дозволяють використовувати електретні мікрофони в традиційних телефонах, які живляться від лінії.

Тому в сучасних пристроях вугільні мікрофони практично не застосовуються. [13]

1.1.2 Конденсаторний мікрофон

Представляє собою, фактично, конденсатор, включений в електричний ланцюг послідовно з джерелом напруги постійного струму (так зване "фантомне живлення") і активним опором навантаження. Схема, яка пояснює конструктивне виконання даного типу мікрофонів зображена на малюнку 3.

Будова конденсаторного мікрофона:

- найтонша рухлива плівка-мембрана з високоякісного пластику без добавок, покрита тонким шаром нікелю або золота;
- нерухома пластина-провідник.

Між двома тонкими шарами знаходиться прошарок повітря, який служить конденсатором в робочому стані. Привести в рух діафрагму під впливом звукових хвиль можна шляхом використання батареї або зовнішнього живлення, зокрема фантомним з постійним струмом 12-48 В.

При цьому всі мікрофони з активними контурами джерела зовнішнього фантомного живлення оснащені запобіжними спецсистемами, що захищають конденсаторний пристрій від пошкодження або замикання. [10]

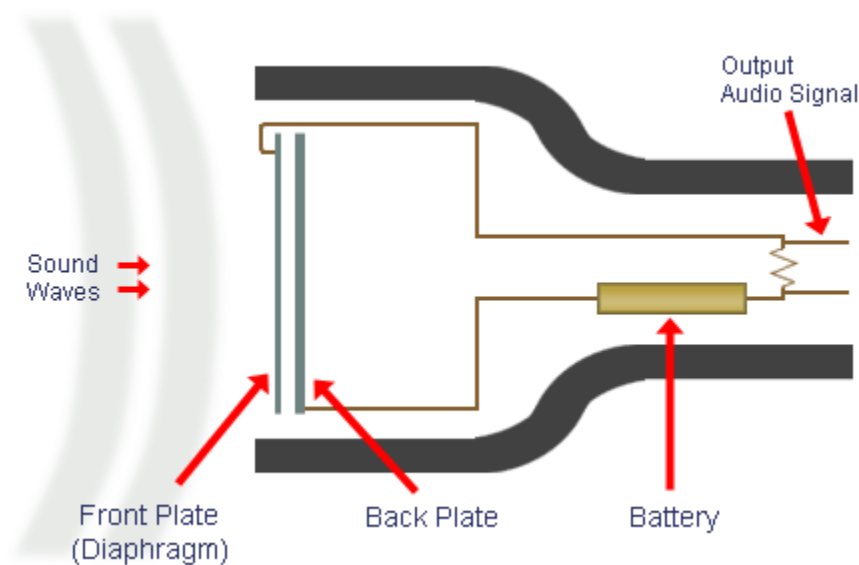


Рисунок 3. Будова конденсаторного мікрофону.

Особливості експлуатації

Щоб конденсаторний мікрофон ефективно працював на повну свою потужність і повністю відповідав усім заявленим характеристикам, необхідно створити електричне поле для руху мембрани від акустичних хвиль. Щоб зрозуміти принцип роботи пристрою необхідно знати його будову.

Принцип роботи

Коли звукова хвиля попадає на діафрагму мікрофона, вона починає здійснювати коливання відносно металевої пластини - іншими словами, дистанція між двома металевими пластинками постійно змінюється з частотою звукового коливання, а з ними змінюється і ємність всієї системи.

Таким чином і виконується основний принцип роботи конденсаторного мікрофона - конвертація звукової енергії, в електричну енергію, шляхом зміни ємності.

Перетворювач імпедансу. Однак енергія однієї маленької конденсаторної системи занадто мало для того, щоб розгойдати сигнал до звичного нам рівня гучності. Вихідна напруга капсуля велика, а ось струм навпаки дуже малий. Тому наступного найважливішою складовою частиною конденсаторного мікрофона є «перетворювач імпедансу» - передавальна схема між капсулем і навколишнім середовищем. Перетворювач імпедансу підсилює потік, завдяки чому на виході мікрофона ми отримуємо значно потужніший сигнал. [11]

Конденсаторні мікрофони здатні забезпечити високоякісний звук, тому широко використовуються в музичних студіях для запису вокалу і різних інструментів. Сучасний конденсаторний мікрофон поєднує в собі високу зовнішню якість виконання, наповненість якісними складовими елементами і забезпечення високоточним звучанням.

Переваги конденсаторного мікрофону: великий частотний діапазон звучання; компактні розміри; натуральне м'яке звучання з високим ступенем прозорості та чутливості; незамінний при студійному записі об'ємного звуку.

Конденсаторний мікрофон здатний забезпечити якісне натуральне звучання і дає змогу досягти високої чутливості.

Недоліки конденсаторного мікрофону: Конденсаторний мікрофон має більш складний пристрій, ніж стандартний динамічний, тому його вартість на порядок вище. Не менш важливим є те, що пристрій вразливий в плані ударів і інших механічних впливів, тому вимагає обережного поводження. У разі падіння конденсаторний мікрофон може вийти з ладу і не відповідати заявленим технічним даним надалі.[10]

Швидкість і потужність переміщення діафрагми залежить від дії звукових хвиль. Електромагнітний заряд пластини-провідника змінюється під впливом наближення до неї або віддалення від неї діафрагми. Іншими словами нестійка напруга відображає рух конденсаторної діафрагми.

Завдяки високотехнологічній будові мікрофона, вони стають уразливими до деяких факторів, а саме на кінцевий результат впливають різкі перепади температурних режимів і підвищена вологість повітря.

Тому при використанні конденсаторної моделі мікрофона необхідно враховувати ці фактори, щоб уникнути появи несприятливих шумів і інших недоліків.[10]

Галузь застосування: Завдяки виключно легкій масі діафрагм конденсаторних мікрофонів, вони більш точно і детально захоплюють звуковий фронт в порівнянні з динамічними мікрофонами.[11]

Саме тому, незалежно від позиціонування виробником, вокальний конденсаторний мікрофон / інструментальний конденсаторний мікрофон - студійний мікрофон завжди буде конденсаторним.

Компактні розміри такого типу мікрофона дозволяють використовувати його в різних музичних напрямках, тобто, від маленьких студій до невеликих концертних залів. В даному випадку компактність не вплинуло на високоточну якість звучання[10]

1.1.3 Електретний мікрофон

Мікрофон з принципом дії, подібним з мікрофонами конденсаторного типу, який використовує в якості нерухомої обкладки конденсатора і джерела постійної напруги пластину з електрету. Використовується здатність цих матеріалів зберігати поверхневий заряд протягом тривалого часу. [12]

Електрети — аморфні речовини, здатні впродовж тривалого часу втримувати наведену поляризацію. Складаються з полярних молекул, наприклад, суміші воску й смоли. Якщо розплавити таку суміш і помістити її в дуже сильне електричне поле, а потім дати затверднути в такому стані, поляризація зберігатиметься днями.

Проте з часом повільні процеси релаксації призведуть до хаотизації орієнтації полярних молекул, і електричний момент поволі зникне. Електричний аналог магніта, що довго зберігає наведений макроскопічний електричний момент (поляризовані електричні заряди) після зняття зовнішнього електричного поля або іншого чинника (освітлення або опромінення, тиску), які викликали поляризацію в речовині.

Застосовуються як джерела сталого електричного поля в деяких мікрофонах, фільтрах повітря, вібродатчиках, детекторах іонізувального випромінювання тощо. [15]

Винайдено японським ученим Егуті на початку 1920-х років. Перший час мікрофони електретного типу були порівняно дороги, а їх дуже високий вихідний опір (в одиниці МОм і вище) змушувало застосовувати для реалізації виключно лампові схеми.

Створення польових транзисторів призвело до появи надзвичайно ефективних і компактних електретних мікрофонів, суміщених із зібраним в тому ж корпусі передпідсилювачем на польовому транзисторі, і з 1970-х років електретні мікрофони стали активно використовуватися в побутовій техніці і широкому спектрі додатків.

Тонка плівка з гомоелектрета поміщається в зазор конденсаторного мікрофона (тобто конденсатора, у якого одна з обкладок (мембрана) має можливість переміщатися під дією зовнішнього акустичного сигналу) або наноситься на одну з обкладок.

Це призводить до появи деякого постійного заряду конденсатора. При зміні ємності, внаслідок зміщення мембрани, на конденсаторі проявляється зміна напруги, відповідне акустичному сигналу.

Принцип дії електретного мікрофона: В такому мікрофоні сама гетероелектретна плівка служить мембраною. При її деформації на її поверхнях виникають різнойменні заряди, які можна зареєструвати, розташувавши електроди безпосередньо на поверхні плівки (на поверхню напильють тонкий шар металу (алюміній, золото, срібло і т.п.).

У конструкцію практично всіх електретних мікрофонів входить попередній («перетворювач опору», «узгоджувач імпедансу») на польових транзисторах, рідше на мініатюрних радіолампах, з вхідним опором порядку 1 ГОм і вихідним опором в сотні Ом, що знаходиться в безпосередній близькості від капсуля.

Тому, незважаючи на відсутність необхідності в поляризуючій напрузі, такі мікрофони вимагають зовнішнє джерело електроживлення.[12]

Типова схема підключення електретного мікрофона приведена на рисунку 4.

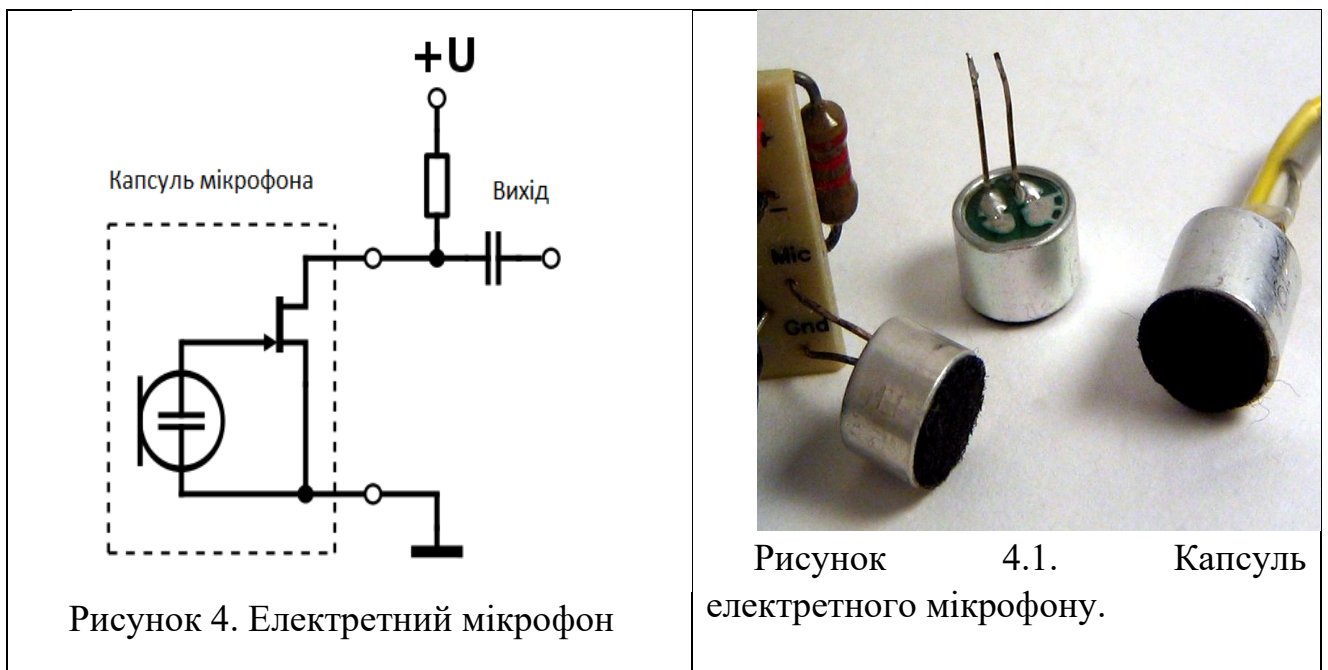




Рисунок 4.2 Будова електретного мікрофону

Переваги електретного мікрофону: Сприймає кожну деталь акустики для досконалого відтворення звуку. Процедура виготовлення досить легка і дешева. Є досить популярними на ринку, тому мають малу ціну. Не потребує зовнішнього джерела живлення. [16]

Недоліки електретного мікрофону: Як правило, мембрана електретних мікрофонів має велику товщину і меншу площу, через що характеристики таких мікрофонів найчастіше поступаються конденсаторним. [6]

На відміну від динамічних мікрофонів, що мають низький електричний опір котушки ($\sim 50 \text{ Ом} \div 1 \text{ кОм}$), електретний мікрофон має надзвичайно високий імпеданс (має ємнісний характер, конденсатор ємністю близько десятків пФ), що змушує підключати їх до підсилювачів з високим вхідним опором. [12]

З плином часу електретний матеріал розряджується, а він в свою чергу виконує роль джерела постійної напруги. Зазвичай, гарантійний строк роботи становить 2 роки.

Галузь застосування: Конденсаторний електретний мікрофон використовується у: звукозаписі, звукопередачі, мобільних радіостанціях, телефонах зв'язку, охоронні системі (прослушка приміщень, здійснивши дзвінок на модем), мікрофонах конференц-залу, системах сповіщення службових приміщень, студійному записі звуку, омофони, радіостанції.

1.1.4 Динамічні мікрофони

Мікрофони, схожі за конструкцією і зворотні за принципом дії динамічних гучномовців. Динамічний мікрофон, конструктивно кілька відмінний від динаміка: у нього інша конструкція мембрани, котушка містить більшу кількість витків і намотана значно тонкішим проводом. Даний мікрофон являє собою мембрану, з'єднану з провідником, який поміщений в сильне магнітне поле, створюване постійним магнітом.

Принцип роботи: Звукові коливання впливають на мембрану і приводять в рух провідник. Коли провідник перетинає силові лінії магнітного поля, в ньому наводиться ЕРС індукції. ЕРС індукції пропорційна як амплітуді коливань мембрани, так і частоті коливань. [6] На відміну від конденсаторних, динамічні мікрофони не вимагають фантомного живлення. За конструктивним виконанням динамічні мікрофони діляться на котушкові і стрічкові.

Котушкові мікрофони бувають: ненаправлені(с круговою характеристикою) та одно направлені (кардіоїдна, суперкардіоїдна та гіперкардіоїдна характеристика) [1]

Принцип дії електродинамічного мікрофону котушкового типу: мембрана механічно жорстко з'єднана з котушкою, що знаходиться в кільцевому зазорі магнітної системи (аналогічно динаміків). При коливаннях діафрагми під дією звукової хвилі витки котушки перетинають магнітні силові лінії, і в котушці наводиться змінна ЕРС.

На даний момент це один з найбільш поширених типів мікрофонів, поряд з електретними. [6] Конструкція динамічного мікрофону котушкового типу зображена на рисунку 5.1

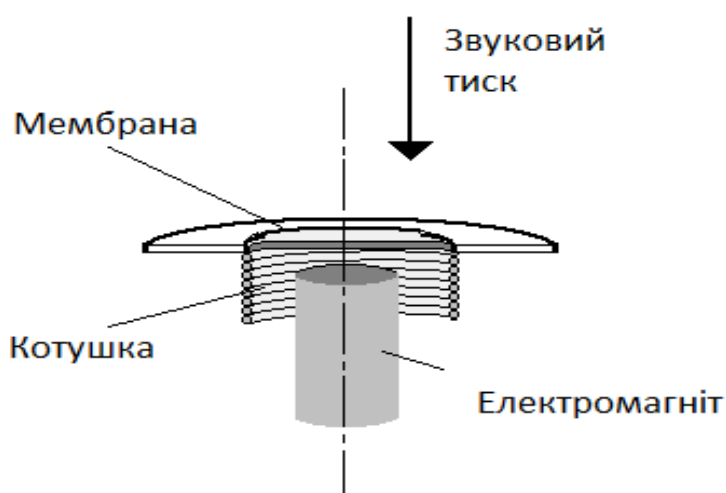


Рисунок 5.1 Динамічний мікрофон котушкового типу.

Принцип дії електродинамічного мікрофону стрічкового типу: замість котушки в магнітному полі розташовується гофрована стрічка з алюмінієвої фольги. Принцип дії ідентичний до котушкового.

Стрічкові мікрофони - це пристрої для запису звуку, що складаються з U-образного магніту і гофрованої алюмінієвої стрічки, розташованої у магнітонапруженому прорізі.

Алюмінієва стрічка, перебуваючи в магнітному полі і повторюючи коливання повітря, створює ЕРС. Електричний сигнал з стрічки подається на первинну обмотку трансформатора для узгодження низького опору стрічки. З тильного боку стрічки знаходиться настроюється резонансна камера і неналаштовуєма наскрізна. Існує так само безкамерна система з діаграмою спрямованості типу "вісімка". [17]

Вважається, що подібна конструкція сприяє більш точному запису високочастотного діапазону. Крім того, дані мікрофони в основній своїй масі мають двосторонню діаграму направленості (т.зв. "вісімка"), яка підходить для запису "стерео". Конструкція стрічкового мікрофона зображена на малюнку 5.2. [18]

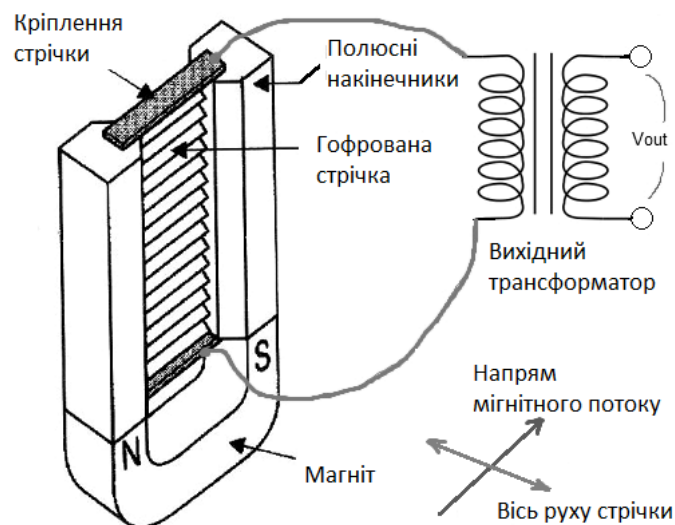


Рисунок 5.2. Електродинамічний мікрофон стрічкового типу.

Переваги електродинамічного мікрофону: Досить задовільні електроакустичні параметри, невеликі габарити, мала маса, відносно проста конструкція і як слід дешевизна виробу, спотворення коливань в звуковому діапазоні невеликі. Не потребує додаткового джерела живлення. Стійкий до механічних пошкоджень, перепадів температури та вологості.

Недоліки електродинамічного мікрофону: Слід пам'ятати, що в силу своєї конструкції, стрічкові мікрофони найчастіше більш вимогливі до умов зберігання, а також можуть мати невисокий поріг верхнього звукового тиску. У деяких випадках, наприклад, банальне зберігання на боці може привести до розтягування стрічки і неможливості роботи мікрофона. [6]

Чутливість діафрагми і здатність коректно працювати з високими частотами нижча за конденсаторні. [18]

Галузь застосування: Радіо, телебачення, телефонія, системи звукопідсилення так звукозапису (застосовують систему з двох однакових одно направлених мікрофонів, розташованих в одному корпусі впритул один під другим так, що напрями їх максимальних чутливостей розташовані під кутом 90 градусів), музикальні передачі із студії. [18]

1.1.5 П'єзоелектричний мікрофон.

У 1925 році, вчені Ржевкін та Яковлев запропонували принципово новий підхід до перетворення звуку в коливання струму - п'єзоелектричний мікрофон. Дії звукового тиску тут піддається п'єзоелектричний кристал. [4]

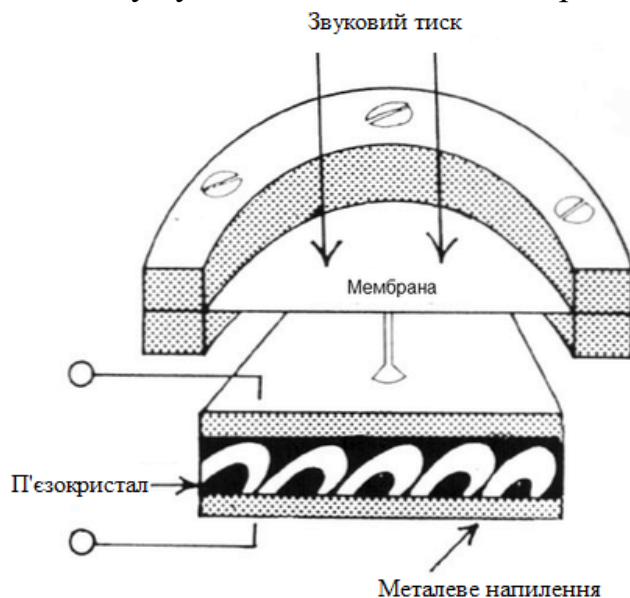


Рисунок 6. Схема п'єзо мікрофону.

Принцип перетворення базується на п'єзоефекті, який пояснює виникнення електричних зарядів (п'єзоелектрики) на гранях деяких кристалів при їхній деформації (прямий п'єзоефект), або навпаки — виникнення деформації цих кристалів внаслідок дії електричного поля (зворотний п'єзоефект). [5]

Звук діє на мембрану, пов'язану зі стрижнем, який в свою чергу закріплений на п'єзоелектрику. П'єзокристал деформується під дією коливань стрижня, а на його виводах з'являється напруга, що повторює форму падаючого звуку. Дана напруга використовується в якості корисного сигналу. [4]

Якщо пластинку вирізати під певним кутом до осі кристала, то можна отримати поляризацію при деформації пластинки від її поперечного вигину. При наклеюванні металевих електродів на дві протилежні грані пластинки між ними отримують різницю потенціалів, пропорційну величині деформації пластинки від поперечного вигину.

Для отримання невеликого «механічного опору при згині пластинку беруть дуже тонкою, а для отримання невеликого електричного (Опору довжину і ширину платівки вибирають порівняно великими.

Для зменшення електростатичного гістерезису, аналогічного магнітному, обклеюють дві пластинки п'єзоелементу із зустрічним розташуванням електричних осей. У цьому разі п'єзоелемент називають біморфним.

П'єзомікрофони відносять до електростатичного типу мікрофона, оскільки основні співвідношення, що керують процесами перетворення коливань, подібні з відбуваються в електростатичних перетворювачах, наприклад, у електретних.

Різниця між ними полягає в тому, що п'єзоелектричні перетворювачі не вимагають електричної поляризації: електричний заряд у них утворюється при деформації. У електретних перетворювачів наявний заряд який пульсує в такт зміні ємності перетворювача, що викликається деформацією електрета

Повний вираз для коефіцієнта електромеханічного зв'язку має такий вигляд:

$$K_{CB} = \frac{K_0}{\omega} \frac{l^2}{h^2} [19]$$

Переваги п'єзоелектричного мікрофону: Простота виготовлення, дешевизна матеріалів та процесів виготовлення.

Недоліки п'єзоелектричного мікрофону: Застосування мікрофонів з кристалами з сегнетової солі обмежена температурною залежністю її роботи. Межі температур від -18 до + 122 °. Найбільш придатні для мікрофонів титанат барію і други керамічні матеріали, що працюють (практично) в будь-якому діапазоні температур. Основними недоліками п'єзомікрофонів є їх високий вхідний опір, складність механічної системи, низька чутливість і велика нерівномірність частотної характеристики. АЧХ п'єзомікрофона поступається АЧХ хорошим динамічним мікрофонам. Застосування їх дуже обмежене [19].

Галузь застосування: вібрознімачі для акустичних гітар, телефонія, мікрофони дуже малих розмірів (такі які кріпляться до одязі оратора на сцені ітд.)

1.1.6 Оптикоакустичний мікрофон

Являє собою високотехнологічний апарат для збору інформації, в якому використовується невидимий інфрачервоний лазерний промінь, за допомогою якого проводиться підслуховування розмов цільового об'єкта.

Цей пристрій є найбільш ефективним пристроєм для віддаленого лазерного прослуховування (лазерним мікрофоном) в світі і дозволяє оператору виконувати не детектує прослуховування аудіо сигналів, що виходять з будь-якого цільового приміщення, що має, принаймні, одне вікно, на значній відстані, яке становить більше 500 метрів .

Найчастіше використовуються відбиття світла лазера від того чи іншого робочого тіла, через що подібні мікрофони іноді називають лазерними мікрофонами.

Лазерний мікрофон для акустичного спостереження є простою в зборі і використанні системою, що складається з трьох головних компонентів: лазерного передавача, лазерного приймача і блоку посилення і еквалізації з аудіо записуючим пристроєм.

Принцип роботи пристрою полягає в передачі невидимого інфрачервоного променя на вікно цільового приміщення. Лазерний мікрофон для акустичного спостереження детектує вібрації віконного скла, що викликаються звуковими хвилями (промовою) всередині кімнати, а потім передає їх назад на приймач. Лазерний промінь, відбиваючись від вікна цільового приміщення, перетворюється в форму електронних сигналів, після чого відбувається фільтрація і посилення сигналів, які потім надсилаються в виділений блок записи, підключений до свого власного підсилювача, оснащеному гучномовцем і головними телефонами.

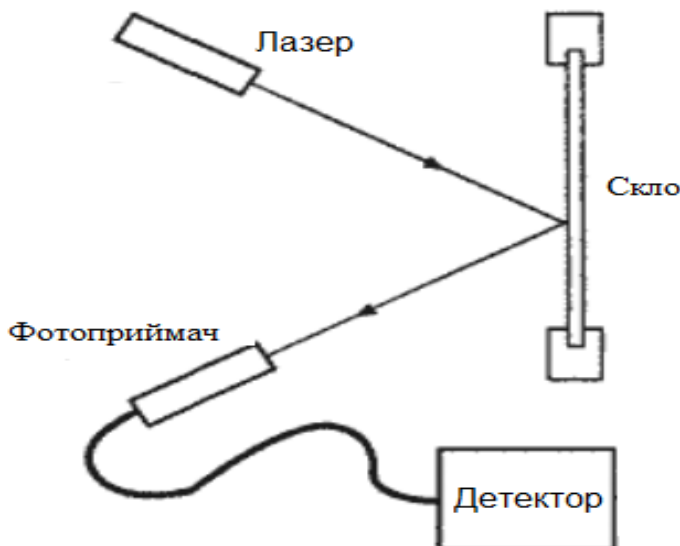


Рисунок 7. Одна із схем оптикоакустичного мікрофона.

Переваги оптоакустичного мікрофону: Можна одночасно вести моніторинг аудіо сигналу в режимі реального часу і запис зазначеного сигналу. Лазерний мікрофон для акустичного спостереження є простою в зборі і використанні системою

Недоліки оптоакустичного мікрофону: Слід розуміти, що найчастіше подібні прилади є штучними зразками, які вимагають особливих алгоритмів обробки сигналу, а також підстроювання компонентів.

Продаж лазерних мікрофонів здійснюється лише службам охорони правопорядку і урядовим органам, а також уповноваженим ними постачальника, що витісняє його з інтересів споживача.

Галузь застосування: Взагалі даний тип мікрофонів досить специфічний і має свої вузькоспрямовані сфери застосування. Схожий принцип може використовуватися в деяких наукових приладах, наприклад, в сейсмографі або високоточних датчиках відстаней .

Даний лазерний мікрофон спеціально розроблений для таємного застосування урядовими та правоохоронними органами в ситуаціях, коли вхід в приміщення персоналу для розміщення пристрою для підслуховування в цільової області є небажаним або неможливим.

Лазерний мікрофон для акустичного спостереження також є вельми важковиявленим в процесі функціонування, тому що інфрачервоний промінь лазера повністю невидимий для неозброєного ока.

1.2 Капсули мікрофонів

Головним елементом мікрофону є його капсула, пряме завдання якої полягає у перетворенні акустичної енергії в електричну. Невід'ємною частиною будь-якої капсули є мембрана - найтонша діафрагма, що реагує на перепади тиску, викликані акустичними хвилями. Залежно від конструкції капсули і мембрани, мікрофон має ту чи іншу характеристику спрямованості.

Капсули по своїй конструкції можна розділити на закритого, відкритого та комбінованого типу. [24]

1.2.1 Капсула закритого типу

Така капсула представляється у вигляді металевого циліндру, одна з сторін якої являє собою мембрану. Усередині капсули підтримується постійний тиск, так як внутрішнє середовище повністю ізольоване (якщо не враховувати капілярний отвір) від зовнішнього і стикається з ним тільки через тонесеньку мембрану.

Коливання тиску зовні, створювані звуковими хвилями, викликають рух мембрани:

- Всередину капсули, коли звукова хвиля знаходиться в своїй позитивній фазі (збільшення тиску).
- Назовні капсули, коли звукова хвиля знаходиться в своїй негативній фазі (зниження тиску)

Напрямок в даній конструкції не має ніякого значення, так як єдиний необхідний фактор для її роботи це факт зміни тиску, а з якого боку це станеться, не має ніякого значення. Мікрофони з капсулами закритого типу мають омнінаправлену характеристику спрямованості.

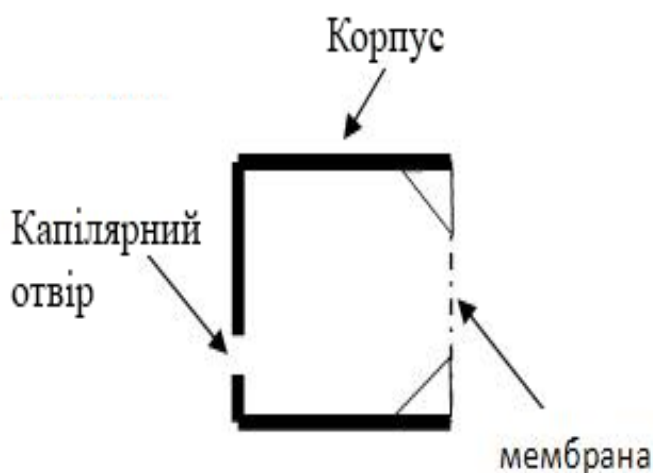


Рисунок 8. Капсула закритого типу

1.2.2 Капсули відкритого типу

Капсули відкритого типу представляють собою конструкцію в якій мембрана відкрита з двох сторін. Це означає, що звукові хвилі можуть досягати її з усіх боків і тим самим впливати на реакцію мембрани, в залежності від напрямку хвилі.

Щоб проілюструвати цей принцип, розглянемо кілька ситуацій:

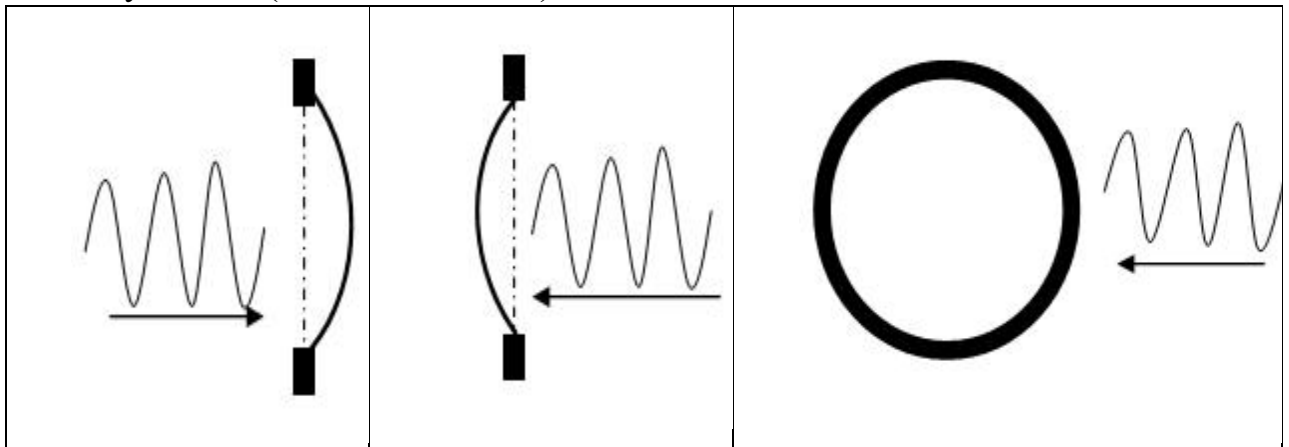
А) На рисунку 8.1.а показана ситуація, коли звукова хвиля приходить з фронтальної сторони мембрани. В результаті підвищення тиску, мембрана прогинається, що інтерпретується як зниження тиску з іншого її боку.

Б) На рисунку 8.1.б бачимо обернений випадок, який демонструє звукову хвилю, яка надходить з тильної сторони мембрани

В) На рисунку 8.1.в звукова хвиля надходить збоку, тобто мембрана повернута боком до фронту хвилі. Це тягне за собою підвищення/пониження тиску з обох сторін, що в свою чергу змусить мембрану залишитись на місці.

Таким чином досягається двостороння напрямленість («вісімка»).

Рисунок 8.1 (а, б, в відповідно)



Існують також капсули комбінованого які являють собою дві капсули, об'єднані в один корпус. Очевидною перевагою такої конструкції є можливість використовувати характерної особливості того чи іншого типу капсули в залежності від необхідності. Однак це має ще й інший ефект - змішуючи в тій чи іншій пропорції сигнали з двох капсул (закритого і відкритого типів) можна домогтися й інших характеристик спрямованості, таких як: кардіоїда, а також супер і гіперкардіоїда, які мають свої переваги в певних ситуаціях. [24]

2. П'єзоелектричний мікрофон

2.1. Основні поняття про п'єзоелектричний ефект

Оскільки напрям дослідження моєї роботи саме п'єзокерамічний мікрофон, то розглянемо його більш детально для кращого представлення ситуації.

В основі роботи такого мікрофону, представляю собою таке явище як п'єзоелектричний ефект, тому дамо чітке визначення.

П'єзоелектрика - явище виникнення поляризації діелектрика під дією механічної напруги (прямий п'єзоелектричний ефект) і виникнення механічних деформацій під дією електричного поля (зворотний п'єзоелектричний ефект).

Прямий і зворотний п'єзоелектричний ефекти спостерігаються в одних і тих же кристалах - п'єзоелектриках. Перше дослідження п'єзоелектричних ефектів зроблено в 1880 братами Ж. і П. Кюрі на кристалі кварцу. Надалі п'єзоелектричні властивості були виявлені більш ніж в 1500 речовин, з яких широко використовуються сегнетова сіль, титанат барію та ін.

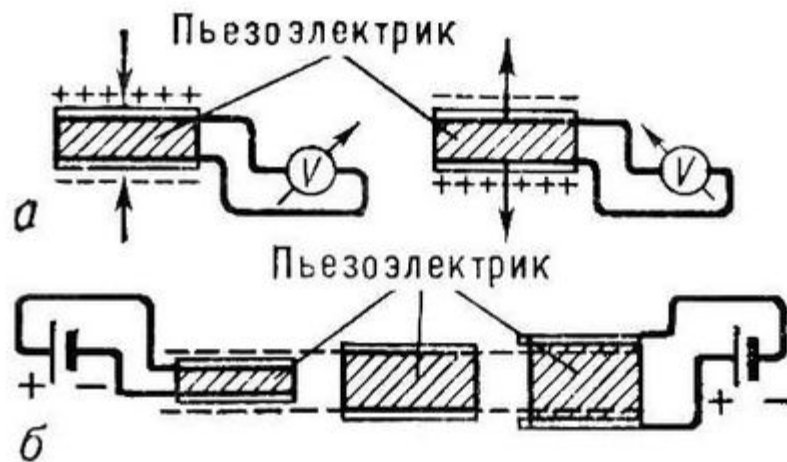


Рисунок 9. а - прямий п'єзоелектричний ефект; стиснення або розтягнення п'єзоелектричної пластини призводить до виникнення різниці потенціалів; б - зворотний п'єзоелектричний ефект; в залежності від знаку різниці потенціалів, яка додається до п'єзоелектричної пластинки, вона стискується або розтягується. [7]

Для електроакустичних приладів застосовують кристали сегнетової солі, з яких вирізають пластинки прямокутної форми.

Протилежні грані пластинки покривають тонким шаром металу, так що виходять дві обкладки. Такий кристал з обкладками називають п'єзоелементом.

Якщо п'єзоелемент стискається під деяким тиском, то на одній обкладці з'являється позитивний заряд, а на іншій - негативний (рис. 10 (а))

Якщо ж характер деформації змінити (рис. 10 (б)), то знаки зарядів зміняться на зворотні.

Це явище називають прямим п'єзоелектричним ефектом

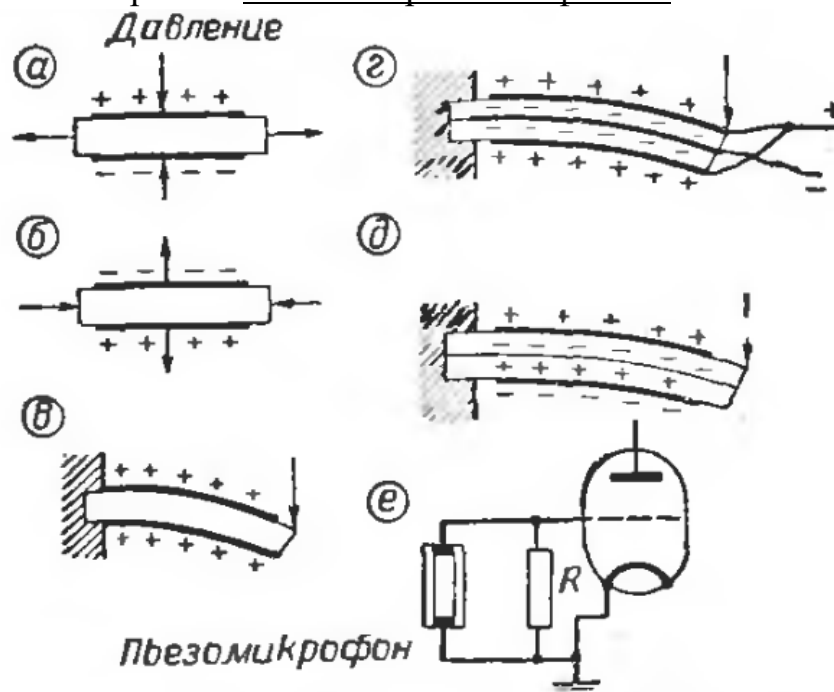


Рисунок. 10 Принцип роботи п'єзомікрофона

Коли п'єзоелемент піддається дії звукових хвиль, то він поперемінно стискається й розширюється і на його обкладках виникає змінна ЕРС, яка своїми змінами повторює звукові коливання.

В цьому і полягає принцип роботи п'єзомікрофона.

У практичних конструкціях п'єзоелемент закріплюється на двох кінцях або одним кінцем і тому при коливаннях під дією звуку він не просто стискається і розширюється, а згинається, як показано на (рис. 10(в)), але тоді нижня його половина (рис. 10 (в)), стискається, а інша - розтягується, і на його обкладках з'являються заряди однакових знаків. Щоб отримати при вигині п'єзоелемента заряди різних знаків, застосовують так звані біморфні п'єзоелементи. Вони робляться з двох п'єзоелементів, склеєних між собою (рис. 10 (г)). Тоді на зовнішніх обкладинках, з'єднаних паралельно, виходить заряд одного знаку, а на внутрішній – протилежного знаку. [8]

Галузь застосування п'єзокераміки: Акселерометри, акустичні сенсори, актюатори, сигналізація, звукові прилади, автомобільна електроніка, формувачі пучка, системи ДУ, очистка зубів, зубна хірургія, детектори, електричні фільтри, ЕАПи, системи контролю емісії, дефектоскопія, датчики сили, газві спалахувачі, гіроскопи, струйні принтери, мікрофони, детектори руху, звукознімачі, гідроакустика, модулятори мовлення, датчики тиску, УЗ зварка та очистка, п'єзотрансформатори[23]

Переваги. Оскільки основним у конструкції п'єзомікрофона є п'єзоелемент, то перевагою такого мікрофона буде його мініатюрність у порівнянні з іншими, особливо у сучасному світі, оригінальний тип п'єзоелектричного мікрофона, який використовував діафрагму, з'єднану з кристалом, сьогодні рідко можна побачити. Чутливість сучасних п'єзоелектричних матеріалів до вібрації така, що впливу звукової хвилі тільки на кристал достатньо, щоб забезпечити адекватний вихід. Також, суттєвою перевагою є простота виготовлення приладу, і в свою чергу, суттєво впливає на остаточну ціну готового приладу. П'єзоелектричні кристали міцні і дешеві, і вони мають відносно великий електричний вихід; з цієї причини їх часто використовують у телефонах та портативних звукових системах. [9]

Недоліки. П'єзоелектричний мікрофон має дуже високий рівень імпедансу та значно вищий вихід, ніж інші типи. Рівень імпедансу має порядок декількох мега Ом, на відміну від кількох Ом для рухомого типу котушки. При такому високому рівні імпедансу електростатичного підхоплення гулу майже неможливо уникнути, поряд із проблемами завантажувального та фільтруючого ефекту кабелю мікрофона. Для низькоякісних мікрофонів такого типу, які колись постачалися з магнітофонами або магнітофонами, це має мало значення, але це виключає використання простого типу п'єзоелектричного мікрофона для студійних цілей. Вони не мають дуже хорошої лінійності і тому недостатньо якісні для запису звуку. [9]

2.1 Параметри якості сучасної кераміки

Якість п'єзокераміки характеризується наступними, прийнятими за кордоном, основними параметрами:

$\frac{\varepsilon_{11}^{\sigma}}{\varepsilon_0}, \frac{\varepsilon_{33}^{\sigma}}{\varepsilon_0}$ - відносна діелектрична проникність;

$\tan \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат при частоті 1 кГц в слабких полях;

T_c (T_k) - температура точки Кюрі;

K_p K_{33} K_{31} K_{15} - коефіцієнти електромеханічного зв'язку;

d_{31}, d_{33}, d_{15} - п'єзоелектричні модулі;

$g_{33} g_{31} g_{15}$ - електричні коефіцієнти по напрузі;

E - модулі Юнга;

s_{11}^E, s_{33}^E - параметр еластичності;

ρ - густина;

Q_m - механічна добротність.

2.2 Огляд сучасної п'єзокераміки

2.2.1 PZT, (цирконат-титанат свинцю $\text{Pb} [\text{Zr} (x) \text{Ti} (1-x)] \text{O}_3$)

PZT, або цирконат-титанат свинцю ($\text{Pb} [\text{Zr} (x) \text{Ti} (1-x)] \text{O}_3$), є одним з найбільш широко використовуваних у світі п'єзоелектричних керамічних матеріалів. При випалюванні PZT має кристалічну структуру перовскіту, кожна одиниця якої складається з невеликого тетравалентного іона металу в решітці з великих двовалентних іонів металу. У випадку PZT, малим тетравалентним іоном металу зазвичай є титан або цирконій.

Великий двовалентний іон металу зазвичай є свинцем. В умовах, які надають кристалам PZT тетрагональну або ромбоєдричну симетрію, кожен кристал має дипольний момент.

Властивості матеріалу PZT

Матеріали PZT і п'єзоелектрики в цілому володіють унікальним спектром властивостей. В основному, при деформації п'єзоелектричного матеріалу утворюється електричний заряд в так званому п'єзоелектричного ефекту. Вірно і зворотне: якщо до п'єзоелектричного матеріалу прикласти електричне поле, то деформація відбувається в так званому зворотному п'єзоелектричного ефекту.

PZT - це п'єзоелектричний матеріал на основі оксиду металу, розроблений вченими Токійського технологічного інституту близько 1952 року. У порівнянні з раніше виявленим п'єзоелектричним матеріалом Barium Titanate (BaTiO_3) на основі оксиду металу, матеріали PZT демонструють більшу чутливість і мають більш високу робочу температуру.

Матеріальний склад PZT

PZT складається з двох хімічних елементів - свинцю і цирконію в поєднанні з хімічною сполукою титанат. PZT утворюється при надзвичайно високих температурах. Тверді частинки фільтруються за допомогою механічного фільтра.

Популярність та актуальність кераміки PZT

PZT, титанат цирконата свинцю, на сьогоднішній день є найбільш часто використовуваної п'єзокерамікою. В цілому, п'єзокераміка є кращим вибором, тому що вона фізично міцна, хімічно інертна і відносно недорога у виробництві. Крім того, вона може бути легко пристосована до вимог конкретної мети.

PZT кераміка відзначається, тому що вона має ще більшу чутливість і більш високу робочу температуру, ніж інші п'єзокераміки.

Застосування кераміки PZT

Кераміка PZT використовується в самих різних областях. М'які (сенсорні) керамічні порошки PZT зазвичай використовуються в тих випадках, коли важливі висока сполучна муфта і / або висока чутливість до заряду, наприклад, в датчиках витрати або рівня; в додатках ультразвукового неруйнівного контролю / оцінки (NDT / NDE); або для точного контролю автомобільної, конструкційної або аерокосмічної продукції. Характеристики матеріалів включають високу діелектричну проникність; високу щільність; високу чутливість до заряду; високу щільність з дрібнозернистою структурою; високу точку Кюрі; і чисту, безшумну частотну характеристику.

Керамічні порошки PZT високої потужності використовуються в тих випадках, коли потрібні високі енергетичні характеристики, в тому числі в таких областях застосування, як: генерація ультразвукової або високовольтної енергії в ультразвукових очисниках, гідролокатори і т.д. [21]

Параметри для різних марок PZT наведені у Таблиці 1.

Таблица 1. Параметры PZT

Morgan Matroc Ltd, (Transducer Products Division)
(Великобритания)

Материал Параметр	PZT-4D	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H	PZT-7A	PT-2
$K_p, \%$	57	51	60	60	65	52	<2
$K_{33}, \%$	67,5	64	71	69	75	67	54
$K_p, \%$	32,5	30	34	36	39	30	<2
$K_{15}, \%$	60	55	69	63	68	68	36
$d_{33}(10^{-12}), \text{Кл/Н}$	315	225	374	500	593	153	68
$d_{31}(10^{-12}), \text{Кл/Н}$	-135	-97	-171	-220	-274	-60	-3
$d_{15}(10^{-12}), \text{Кл/Н}$	-	300	585	670	741	360	70.
$d_h(10^{-12}), \text{Кл/Н}$	45	31	32	60	45	33	62
$g_{33}(10^{-3}), \text{В·м/Н}$	24,6	25,4	24,8	21,7	19,7	41	37
$g_{31}(10^{-3}), \text{В·м/Н}$	-10,5	-10,9	-11,4	-9,6	-9,1	-16	-2,0
$g_{15}(10^{-3}), \text{В·м/Н}$	-	-28,9	38,2	35	26,8	50	34
$g_h(10^{-3}), \text{В·м/Н}$	3,6	3,6	2,0	2,5	1,5	9,0	33,0
$d_h(10^{-3}), \text{В·м/Н}$	162	112	64	150	68	297	2000
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1300	1100	1700	2600	3400	425	210
$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1475	1290	1730	-	-	-	240
$\tan\delta$	0,004	0,002	0,02	0,02	0,025	0,025	0,02
Q_M^P	600	1000	75	75	65	600	1100
$\rho (10^3), \text{кг/м}^3$	7,6	7,6	7,7	7,4	7,45	7,7	6,9
$T_c, ^\circ\text{C}$	320	300	365	250	195	350	255
$T_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	200	175	250'	140	110	210	130
$N_b, \text{Гц·м}$	1515	1700	1400	1450	1420	1750	-
$N_p, \text{Гц·м}$	2180	2300	1960	1980	1965	2340	2870
$N_c, \text{Гц·м}$	990	1070	890	910	890	1070	-
$N_3, \text{Гц·м}$	2000	2070	1880	-	2000	2100	2145
$S_{11}^E(10^{-12}), \text{м}^2/\text{Н}$	13,3	11,5	16,4	16,2	16,4	10,7	7,4
$S_{33}^E(10^{-12}), \text{м}^2/\text{Н}$	16,8	13,5	18,8	22,7	20,8	13,9	8,6
$C_{11}^E(10^{10}), \text{Н/м}^2$	7,5	8,7	6,1	6,2	6,1	9,3	13,5
$C_{33}^E(10^{10}), \text{Н/м}^2$	5,9	7,4	5,3	4,4	4,8	7,2	11,6
$S_{11}^D(10^{-12}), \text{м}^2/\text{Н}$	11,8	10,1	14,4	14,1	14,1	9,7	7,3
$S_{33}^D(10^{-12}), \text{м}^2/\text{Н}$	-	8,5	9,4	-	9	7,9	6,1
$C_{11}^D(10^{10}), \text{Н/м}^2$	8,5	9,9	6,9	7,1	7,1	10,3	13,7
$C_{33}^D(10^{10}), \text{Н/м}^2$	-	11,8	10,6	-	11,1	12,7	16,4
$R, \text{Ом·м} (25^\circ\text{C})$	-	10"	-	-	10"	10»	-

2.2.2 Високотемпературні п'єзокерамічні матеріали

П'єзокерамічні елементи на основі високотемпературних матеріалів застосовуються для датчиків вібрації акселерометрів та актюаторів, для приладів високотемпературної дефектоскопії, товщинометрії, працюючих при температурах вищих за 250 градусів Цельсію.

НДІ «Елпа» (Росія) виготовляє високотемпературну кераміку ТНаВ-1, ТНаВ-1м, ТН6В-1, ЦТС-26, ЦТС-26м, ЦТС-21, ТСВС-2. Наприклад, максимальна робоча температура, при якій основні параметри високотемпературного п'єзокерамічного матеріалу не відчують необортних наслідків, у матеріалі: ТН6В-1 – 750 °С, ТНВ-1 – 700 °С, ТНаВ-1 - °С.

Piezo Technologies (USA), виготовляє високотемпературну кераміку K12, яка робиться з титанату-вісмута. Вона має робочу температуру 820 °С. [23]

2.3 Огляд різних варіантів конструкції п'єзокераміки.

2.3.1 П'єзокерамічні актюатори

П'єзокерамічні елементи окремо (одним елементом) в виконавчих пристроях використовуються досить рідко. керамічна технологія виготовлення п'єзоелементів не накладаються принципових обмежень на їх форму і розміри, але один п'єзоелемент може працювати в досить обмеженому діапазоні переміщень (0,01 - 0,1 мкм).

Для розширення функціональних можливостей та, зокрема, збільшення діапазону переміщень п'єзоелементи об'єднують в більш складні конструкції, які прийнято називати п'єзоелектричними актюаторами.

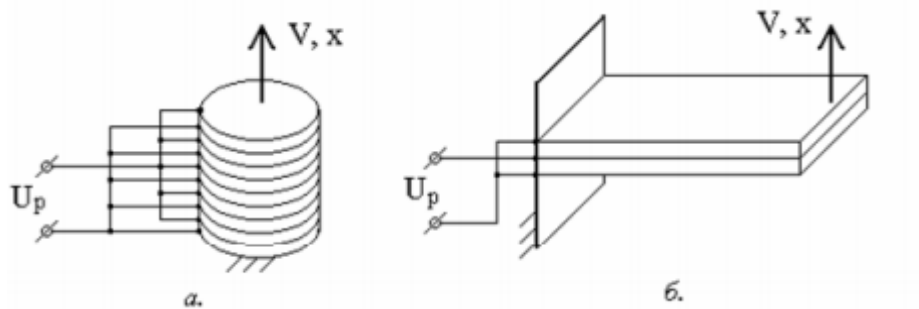


Рисунок 11. а-пакетна конструкція б-біморфна конструкція

Актюатори поділяються на три основні групи:

- осьові (мода d_{33})
- поперечні (мода d_{31})
- гнучкі або біморфні (мода d_{31})

Осьові і поперечні актюатори мають ще загальну назву - багатошарові пакетні (або складові), так як набираються з декількох п'єзоелементів (Дисків, стрижнів, пластин, циліндрів або брусків) в пакет (Stack Actuators). Максимальні габарити визначаються можливостями існуючого технічного процесу виготовлення п'єзокерамічних виробів.

Пакетні актюатори можуть виготовлятися підприємствами, не пов'язаними з виробництвом п'єзокераміки. [22]

2.3.2 Пакетна конструкція

Пакетна конструкція являє собою набір з окремих п'єзоелементів з металізованими поверхнями (шайб, дисків циліндрів), число яких може перебувати в межах від 5 до 200 шт. і визначається необхідним діапазоном переміщень. Матеріал електродів - срібло і срібно-паладієвий сплав - наноситься методом трафаретного друку або вакуумного напилення на керамічну поверхню (товщина шару 6-12 мкм). Невелике переміщення кожного п'єзоактивного шару підсумовується в загальне переміщення в діапазоні від одиниць мікрон до десятків мікрон при зусиллі від сотень до декількох тисяч Ньютонів. Такі актюатори також називають «потужними з обмеженим діапазоном переміщень».



Рисунок 12. А- Пакетний актюатор з кілець, Б – дисків, В- Армований пакет зі стягуючою шпилькою.

Пакет формують склеюванням або шляхом пайки м'яким і твердим припоєм однополярних поверхонь, поєднуючи їх механічно послідовно, а електрично паралельно, що дозволяє створити досить жорсткий пристрій, що володіє максимальною деформацією. Допустима напруженість електричного поля п'єзокераміки близько 1-2 кВ / мм, отже, для зменшення напруги, що управляє, необхідно зменшувати товщину п'єзоелемента (зазвичай вона знаходиться в межах від 0,3 до 0,6 мм).

При цьому максимальне значення напруги управління становить 300 - 600 В. В особливо відповідальних застосуваннях пакети попередньо стискають (кільцеві і циліндричні актюатори за допомогою осевих стягуючих шпильок або болтів, дискові - за допомогою зовнішнього пружного корпусу), при цьому забезпечується вибірка міжелектродних зазорів, зниження величини гістерезису.

Крім того, попереднє навантаження дозволяє працювати при подачі позитивної і негативної напруги, виключає нахил кінцевих поверхонь актюатора і забезпечує їх паралельність при установці в виробках[22]

2.3.3 Багатошарові актюатори

В даний час в умовах широкого впровадження актюаторів в приладобудуванні, електронній, хімічній, фармацевтичній, автомобільній промисловості, до них висуваються жорсткі вимоги по габаритам, діапазонах переміщень, величинам керуючих напруг, діапазонах робочих температур і т.д.

Більшість пакетних пристроїв, розроблених в кінці минулого століття, перестали задовольняти цим вимогам. Їм на зміну прийшли тонкоплівкові багатошарові актюатори.

Багатошарові актюатори складаються з чередуючих тонких шарів п'єзокераміки та електродів. Товщина керамічного шару зазвичай 20-100 мкм, товщина внутрішніх електродів до 3-4 мкм. Як матеріал для електродів використовується сплав сребро-палладій з невеликою добавкою п'єзокераміки, що забезпечує підвищену адгезію - силу зчеплення металевого сплаву з керамікою.

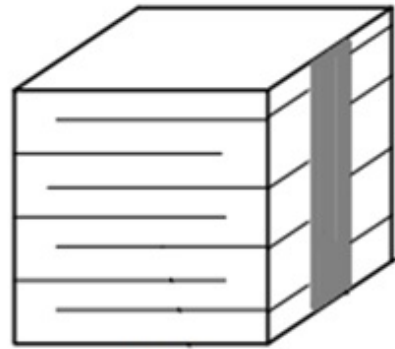


Рисунок 13. Багатошаровий актюатор

Габарити: перетин і висота актюаторів визначаються технологічними можливостями обладнання і, як правило, ці величини змінюються в межах 2x2 до 20x20 мм, а максимальна висота моноблочної конструкції становить близько 100 мм. З'єднання шарів між собою здійснюється шляхом спікання під тиском внутрішніх металевих електродів кожного шару при цьому досягається щільність близька до теоретичної межі монолітної кераміки. У багатошаровому актюаторі кожен шар з'єднаний з подальшим шаром електрично паралельно. Усі суміжні шари п'єзокераміки поляризовані в зустрічному напрямку, в результаті переміщення, створюване структурою, є сумою переміщень всіх шарів.

На бічні грані актюатора наносяться зовнішні електроди з срібла, до яких пайкою приєднуються проводи для подачі керуючої напруги. [22]

Перевага конструкції полягає в тому, що для заданого рівня деформації потрібна на порядок менша електрична напруга, ніж у пакетних актюаторів з тими ж розмірами. зазвичай у сучасних багатошарових актюаторів напруга не перевищує 100 вольт.

Багатошарові актюатори виготовляють за стандартною технологією багатошарових конденсаторів. На початковому етапі формується пакет з тонкошарових пластин або шайб. при великому тиску пакет ущільнюється і спікається при високій температурі. Утворюється багатошаровий керамічний блок з параметрами, близькими до теоретичної межі монолітної кераміки.

На відміну від пакетних актюаторів, багатошарові актюатори мають більш високу жорсткість і деформацію і, відповідно, більш високу резонансну частоту. Вони здатні розвивати значні сили пропорційні площі перетину (Перетин 2×2 мм 2 може мати силу до 1000 Н).

Недоліки конструкції: великі значення власної ємності актюаторів, що пояснюється наявністю великої кількості паралельно з'єднаних шарів кераміки малої товщини. Даний недолік призводить до зниження швидкодії виконавчих п'єзоелектричних приводів з тонкоплівковими багатошаровими актюаторами. Величина ємності збільшується з ростом амплітуди сигналу управління, при збільшенні температури і величини стискаючого зусилля. Дані фактори потрібно враховувати при проектуванні п'єзодвигунів. [22]

Галузь застосування: В даний час основними областями застосування багатошарових актюаторів є:

- Системи впорскування палива - управління клапанами з швидкістю ~ 1 10 мс при максимальному ході 3-5 мкм і зусиллям до 5 кН;
- Системи гасіння вібрації, зусилля до 100 кН;
- Системи гальмування і системи підвіски автомобіля;
- Оптико-механічні пристрої з системою активної стабілізації;
- Системи гасіння вібрації корпусу і крила літака з метою зниження рівня шуму до 40-10 дБ і т. д. [22]

2.3.4 Біморфна конструкція

Біморф складається з двох частин - двох п'єзоелементів, з'єднаних між собою, або п'єзоелемента і металевої пластини, також з'єднаних між собою за допомогою епоксидного компаунда або легкоплавкого припою.

Біморфні елементи, що складаються з двох п'єзоелементів були названі симетричними. Мова тут йде про симетрії матеріалу біморфного елемента відносно нейтральної площини при його вигині.

Біморфні елементи, що складаються з п'єзоелементів і металевої пластини, були названі асиметричними. Відомі дві схеми з'єднання п'єзоелементів: послідовна і паралельна (рисунок 14, а, б відповідно)

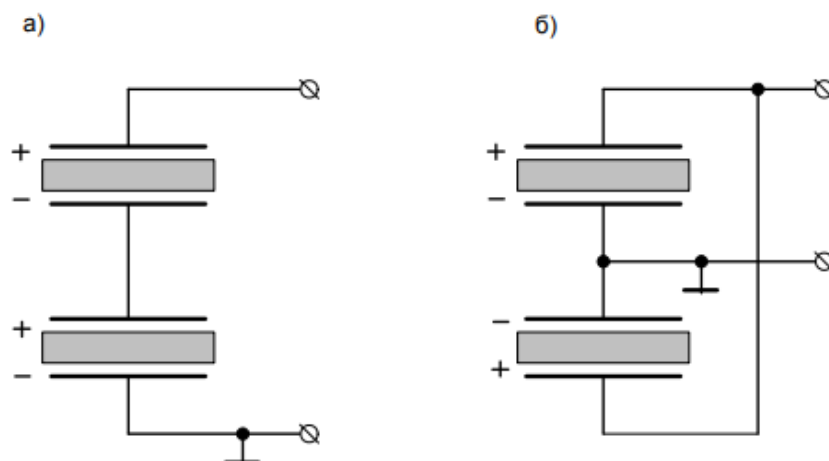


Рисунок 14. Схеми з'єднання п'єзоелементів в аморфному симетричному перетворювачі (а-послідовно, б-паралельно)

Традиційно ці перетворювачі виготовляються з пластин однакових розмірів і, що дуже важливо, однакової товщини (відповідно до малюнку 15). Це забезпечує максимальну чутливість.

Слід, відзначити, що при однакових розмірах п'єзоелементів чутливість перетворювача по паралельній схемі і його власний опір в чотири рази менше відповідних показників перетворювача по послідовній схемі.

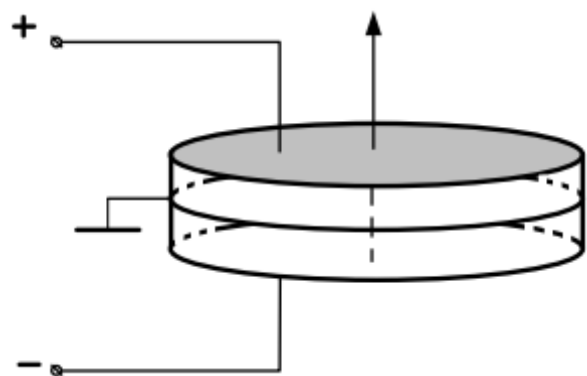


Рисунок 15. Біморфний актюатор

Для послідовної схеми і зустрічного включення при рівності чутливості окремих елементів сумарна (загальна) чутливість біморфного перетворювача дорівнює нулю. Якщо ж товщини п'єзoeлементів не рівні, то не рівні і чутливості, тоді чутливість біморфного перетворювача дорівнюватиме різниці чутливостей окремих елементів.

Найпростіша біморфна конструкція (рисунок 16) являє собою дві склеєні між собою п'єзoeлектричні пластини, напруга управління на які подається таким чином, щоб одна з них скорочувалася, а інша розширювалася.

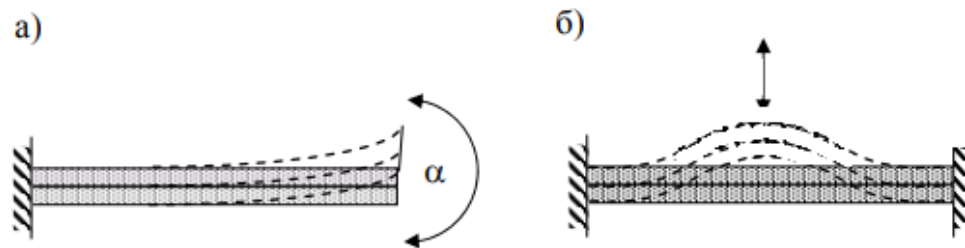


Рисунок 16. Біморфні конструкції.

При цьому відбувається вигин всієї конструкції (за аналогією з біметалічною пластиною). Якщо конструкція закріплена тільки з одного боку малюнок 16 а), то вільний кінець здійснює кутові переміщення, а якщо з двох сторін малюнок 16 б), то центральна її частина здійснює лінійні переміщення, рівні прогину всієї конструкції.

Використовується для збільшення діапазону лінійних переміщень (до од. мм) і отримання кутових переміщень об'єктів (до декількох градусів) невеликої маси до десятків грам і розвиває незначну блокуючу силу.

Так, американська компанії APC International Inc. випустила новий тип пластинчастого біморфа - «стрічковий актюатор» (zareestrovana торгова марка).

Стрічковий актюатор може забезпечувати блокуючу силу 0,95 Н і величину відхилення 1,2 мм або відхилення до 3 мм і блокуючу силу 0,6 Н. Гнучкі актюатори відносяться до групи малопотужних

3. Моделювання конструкції для дослідження та розрахунки

3.1 Перелік усіх деталей вимірювального стенду.

Вимірювальний стенд представляю собою п'єзокерамічну пластину, яка лежить на підложці для перешкодження її руйнування під час механічних навантажень. Система п'єзоелемент-підложка статично закріплена анкером.

На пластину кріпиться стрижень до якого в свій час прикріплена мембрана у вигляді зрізаного конусу. Г.У. П'єзоелемент електрично ізольований від усіх інших елементів стенду.

3.2 Вибір матеріалів для кожного елемента стенда, та задання габаритних розмірів

Елемент	Матеріал	Габарити (Д,Ш,В) [мм]
Анкер	Сталь	4 x 4 x 3.7
П'єзоелемент	ПЗТ-7А	12 x 2 x 0.2
Підложка	Сталь	12 x 2 x 1

Елемент	Матеріал	Діаметр/Висота [мм]
Стрижень	Алюміній	1 x 3
Мембрана	Алюміній	5/20 x 5

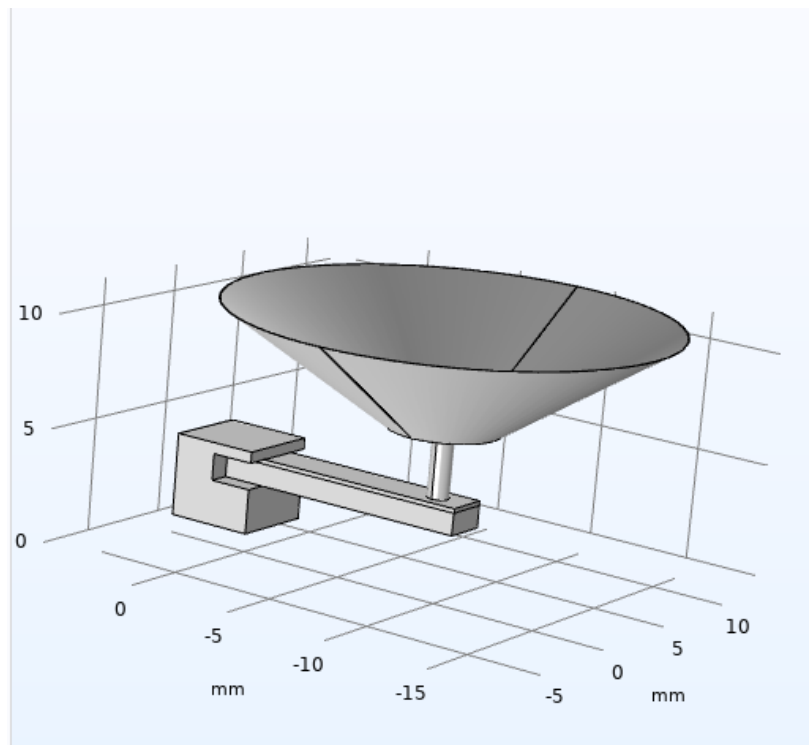


Рисунок 17. Модель вимірювального стенду

3.3 Фізичні параметри матеріалів

3.3.1 Алюміній

Густина $\rho = 2700$ [кг/м³]

Модуль Юнга $E = 70$ [МПа]

Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0.33$

Діелектрична проникність $\varepsilon = 9.3e-12$

Теплоємність при сталому тиску $C_p = 900$ [Дж/кг·К]

Теплопровідність $q = 238$ [Вт/(м·К)]

Електропровідність $\sigma = 3.774e7$ [См/м]

Теплове розширення $\alpha = 23e-6$ [1/К]

Коефіцієнт Ламе $\lambda = 51$ [МПа]

Коефіцієнт Ламе $\mu = 2.6$ [МПа]

3.3.2 Сталь конструкторська

Густина $\rho = 7850$ [кг/м³]

Модуль Юнга $E = 200$ [МПа]

Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0.3$

Теплоємність при сталому тиску $C_p = 475$ [Дж/кг·К]

Теплопровідність $q = 44.5$ [Вт/(м·К)]

Електропровідність $\sigma = 4.032e6$ [См/м]

Теплове розширення $\alpha = 12.3e-6$ [1/К]

Коефіцієнт Ламе $\lambda = 115$ [МПа]

Коефіцієнт Ламе $\mu = 76.9$ [МПа]

3.3.3 П'єзокераміка PZT-7A

Густина $\rho = 7700$ [кг/м³]

Модулі пружності s^E ($E = \text{const}$):

$$s_{11}^E = 10.7 \text{ [пПа]}$$

$$s_{12}^E = -3.2 \text{ [пПа]}$$

$$s_{13}^E = -4.6 \text{ [пПа]}$$

$$s_{33}^E = 13.9 \text{ [пПа]}$$

$$s_{44}^E = 39.5 \text{ [пПа]}$$

П'єзоелектричні модулі d :

$$d_{31} = -60 \text{ [пКл/Н]}$$

$$d_{33} = 150 \text{ [пКл/Н]}$$

$$d_{15} = 368 \text{ [пКл/Н]}$$

Відносні діелектричні проникності при ($\sigma = 0$):

$$\frac{\varepsilon_{11}^{\sigma}}{\varepsilon_0} = 836$$

$$\frac{\varepsilon_{33}^{\sigma}}{\varepsilon_0} = 425$$

3.4 Підготовка до розрахунків

Для розрахунків був використаний програмний пакет COMSOL Multiphysics 5.5, який значно спрощує процес обрахунку, та візуально зрозуміло показує заданий фізичний процес.

Габарити п'єзокераміки, задані у пункті 3.2, були вибрані після розглянутих графіків АЧХ для довжини п'єзопластини: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 [мм].

На мембрану рівномірно подається звуковий тиск 0.002 [Па] (40 дБ).

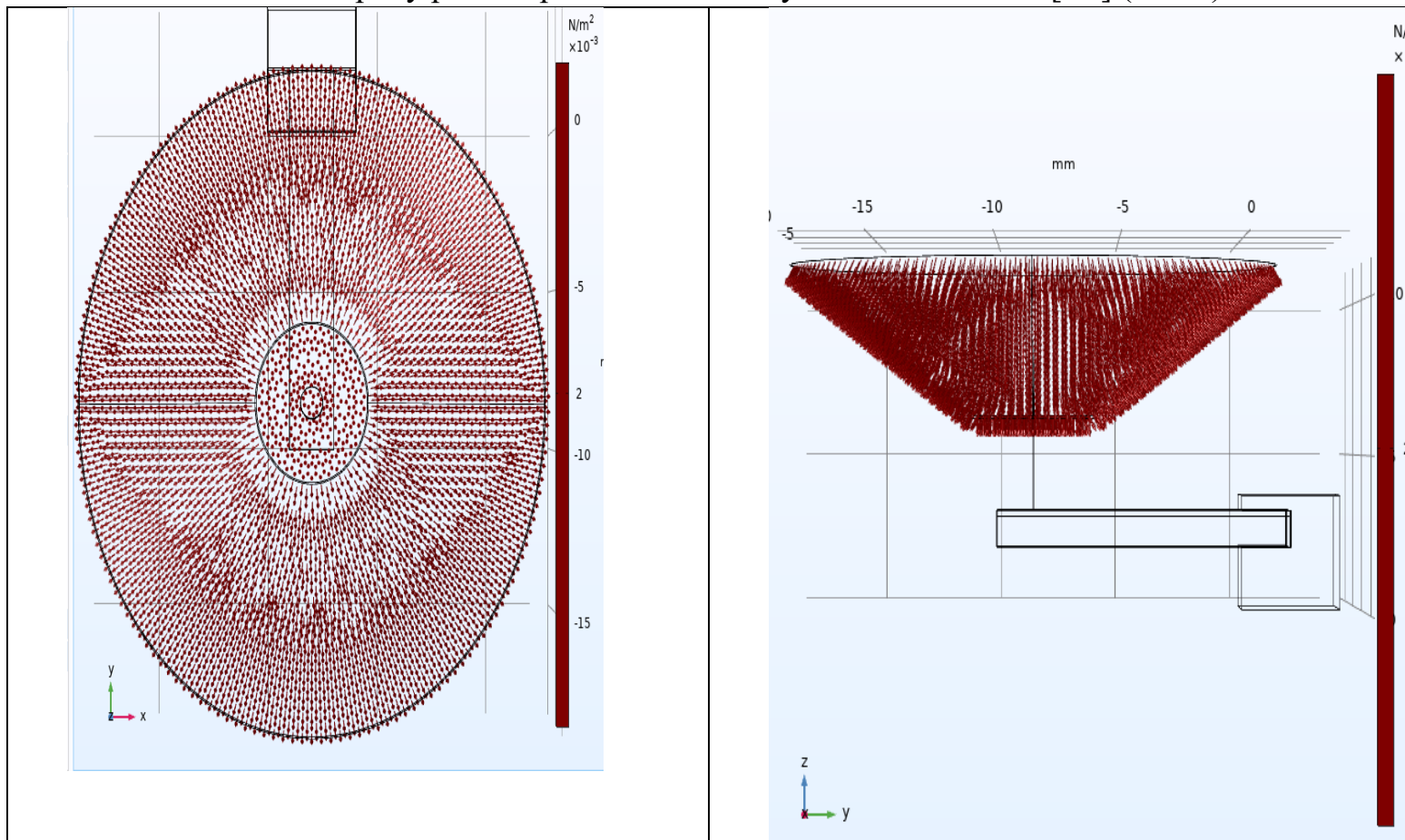
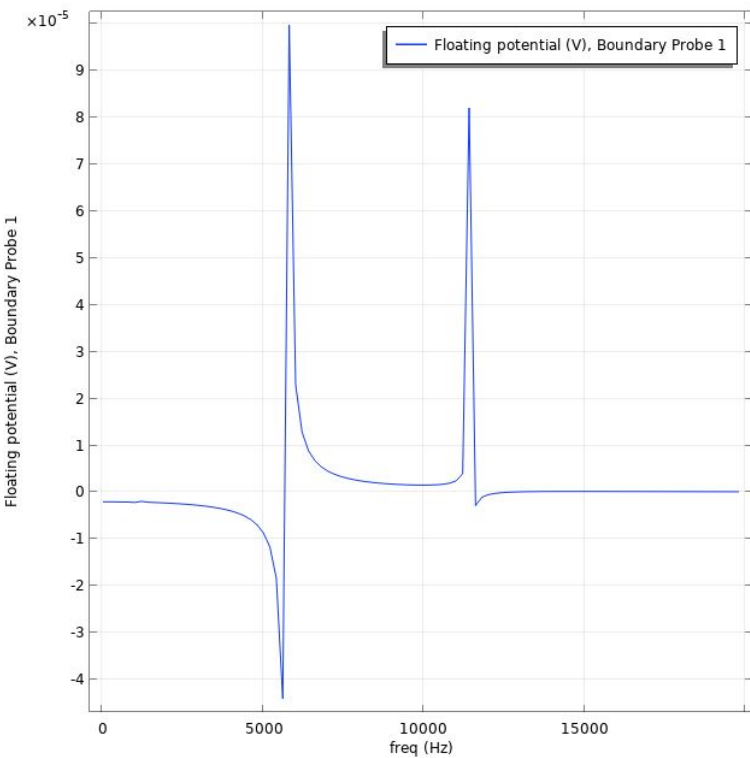


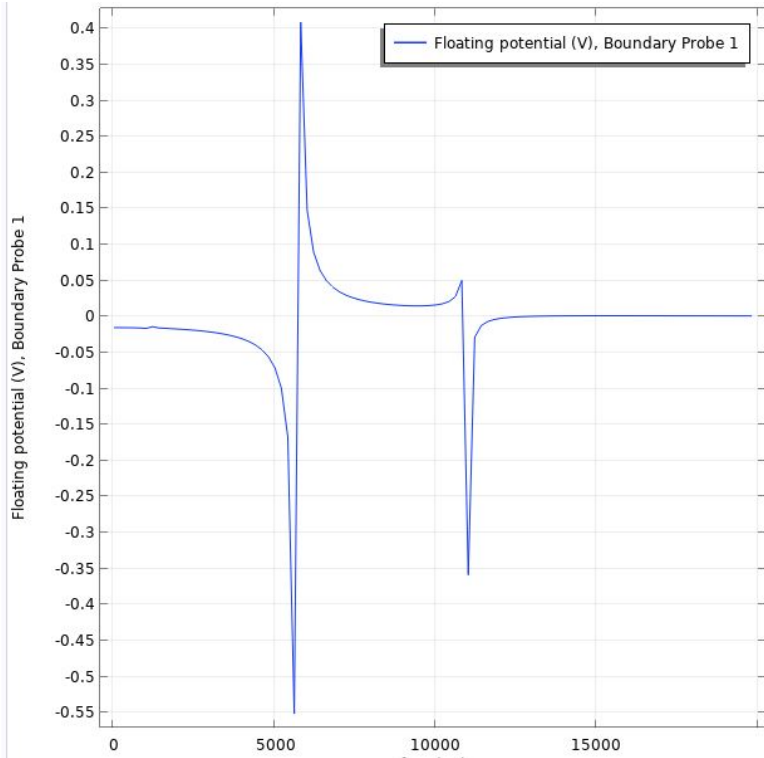
Рисунок 18. Вектори напрямку тиску на мембрану

3.5 Результати розрахунку

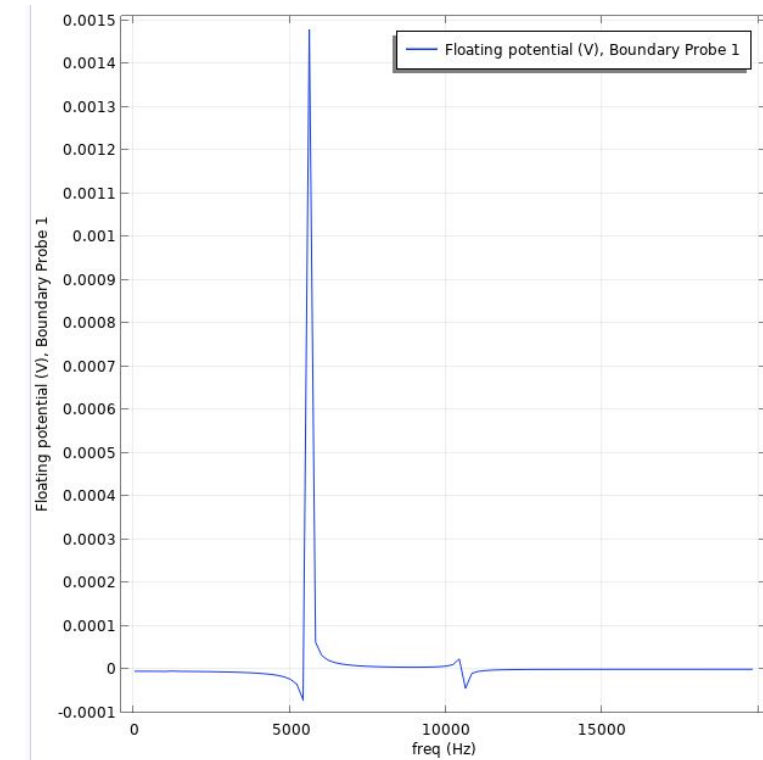
3.5.1 АЧХ для кожної з довжин ПЗТ-7А (20 Гц – 20 кГц)



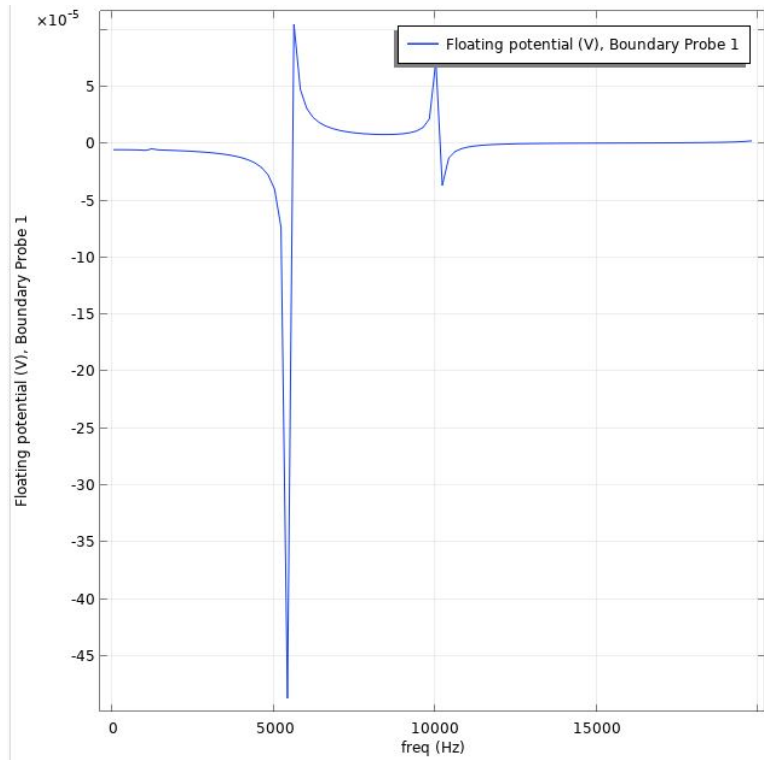
Довжина пластини 6 [мм]



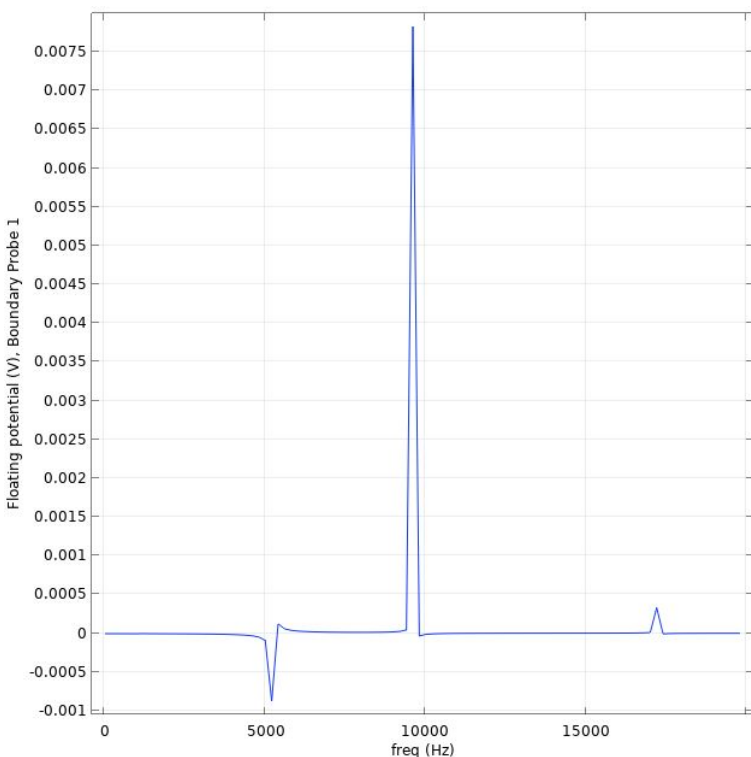
Довжина пластини 7[мм]



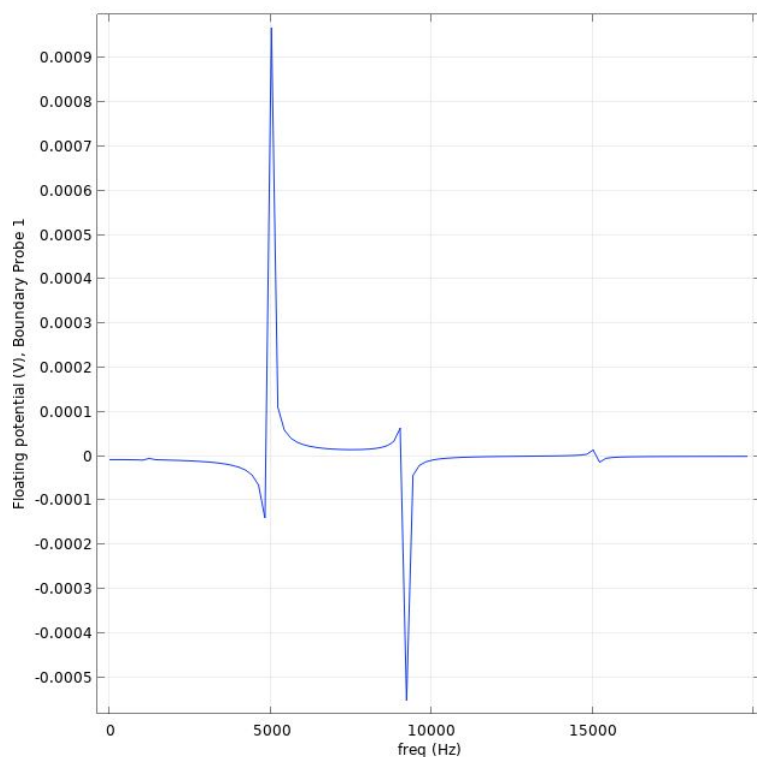
Довжина пластини 8 [мм]



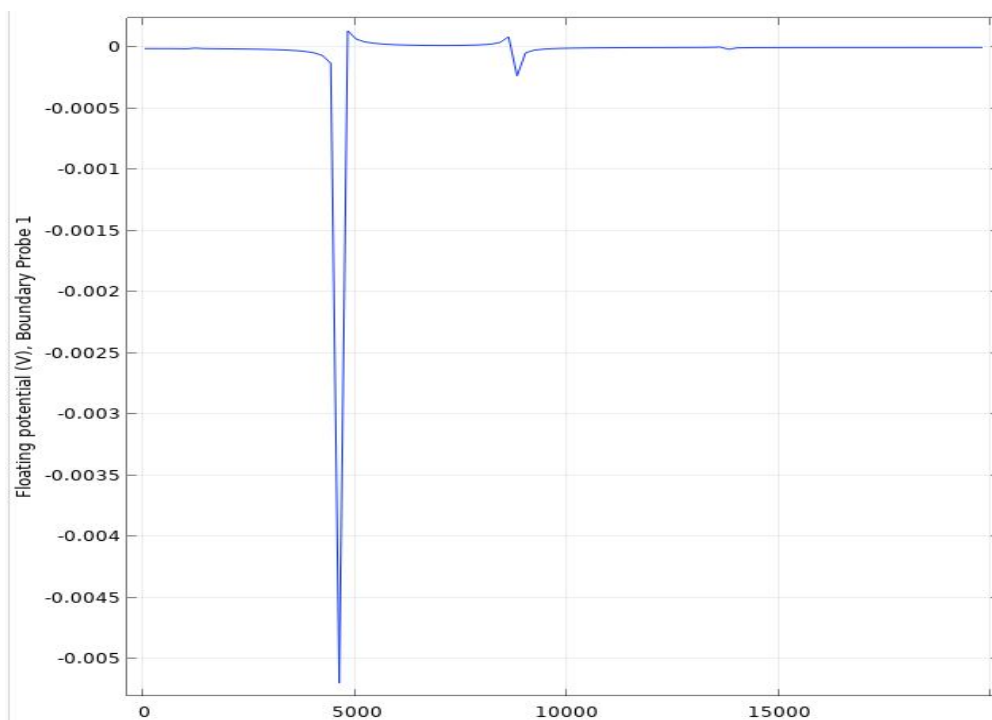
Довжина пластини 9[мм]



Довжина пластини 10 [мм]

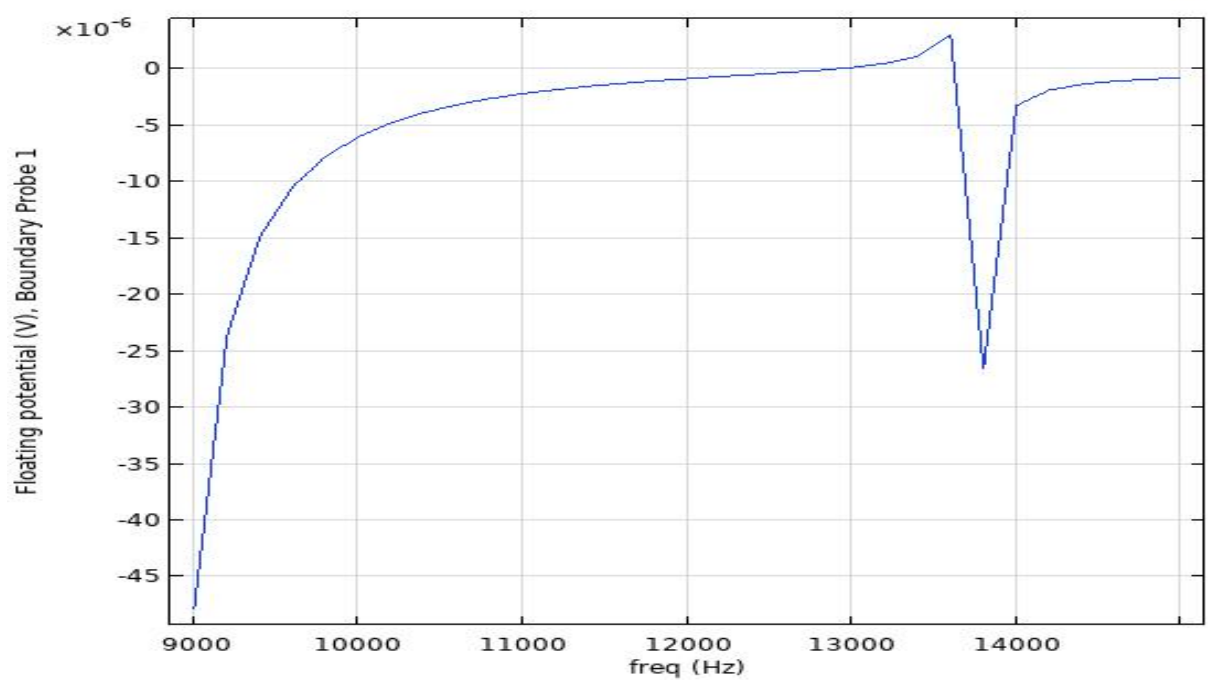
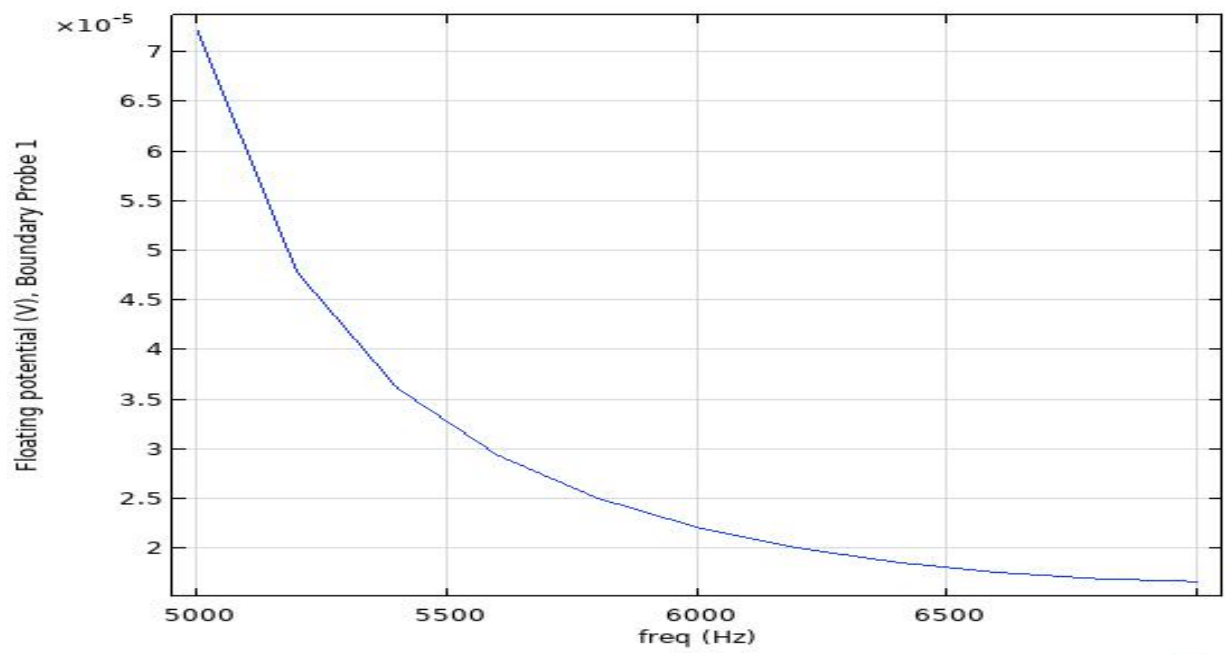
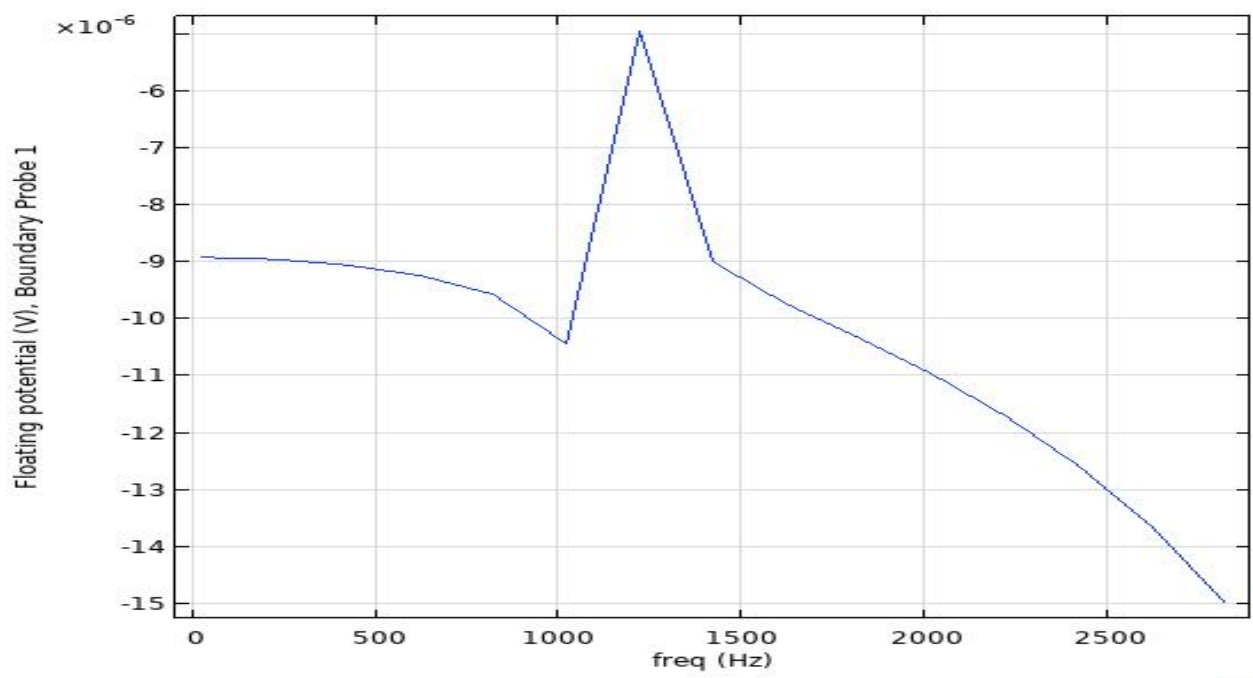


Довжина пластини 11[мм]

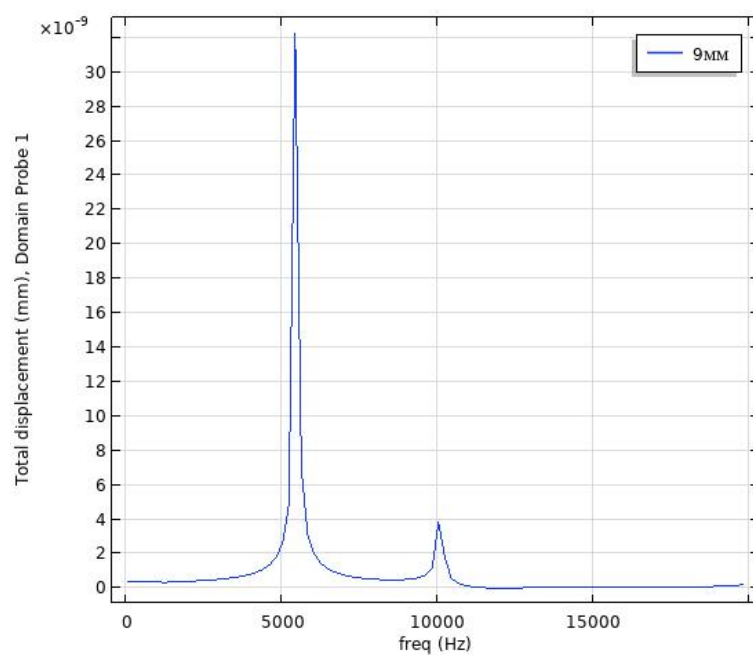
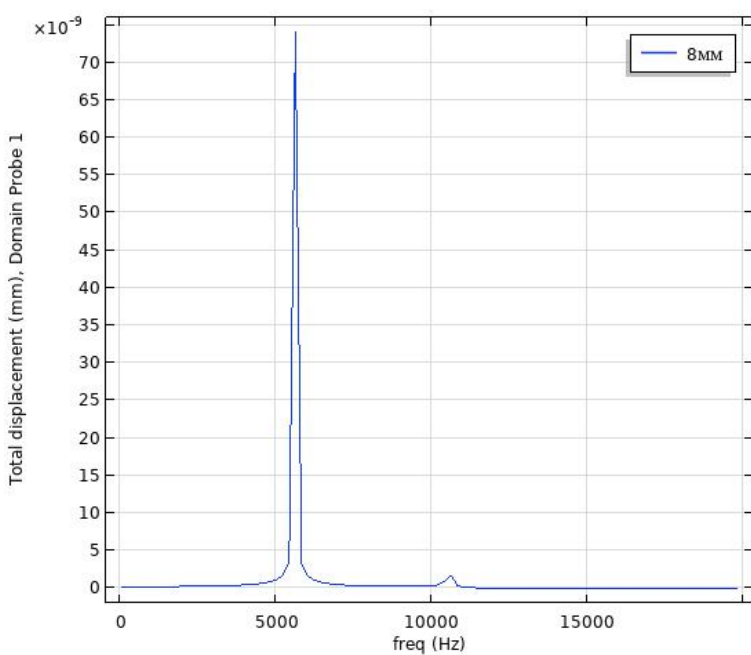
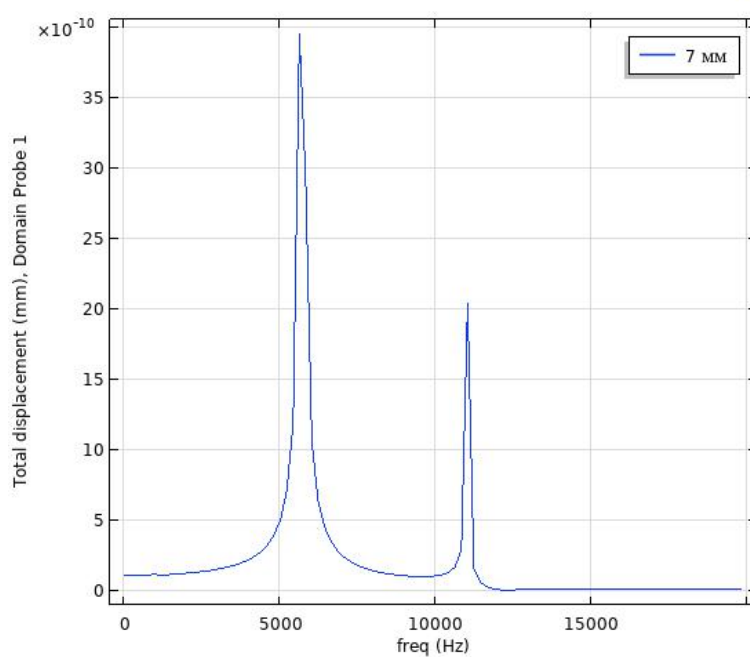
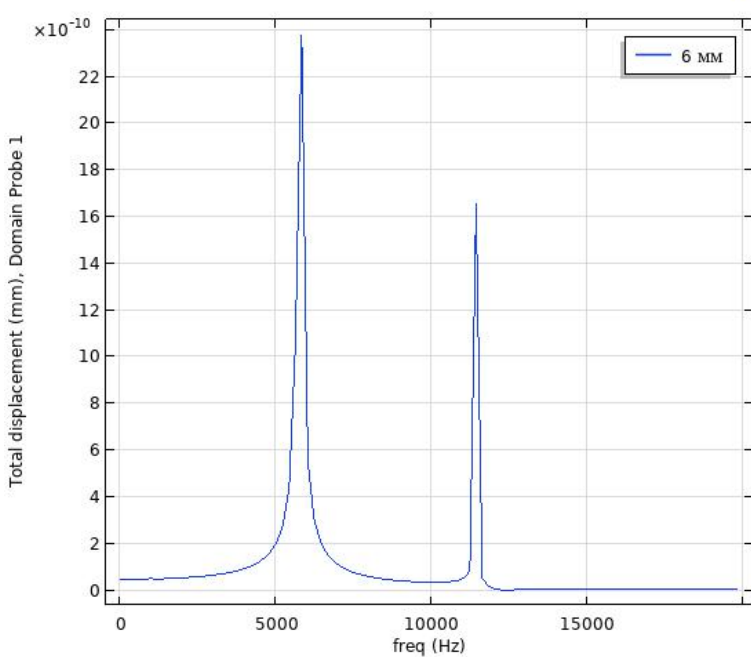


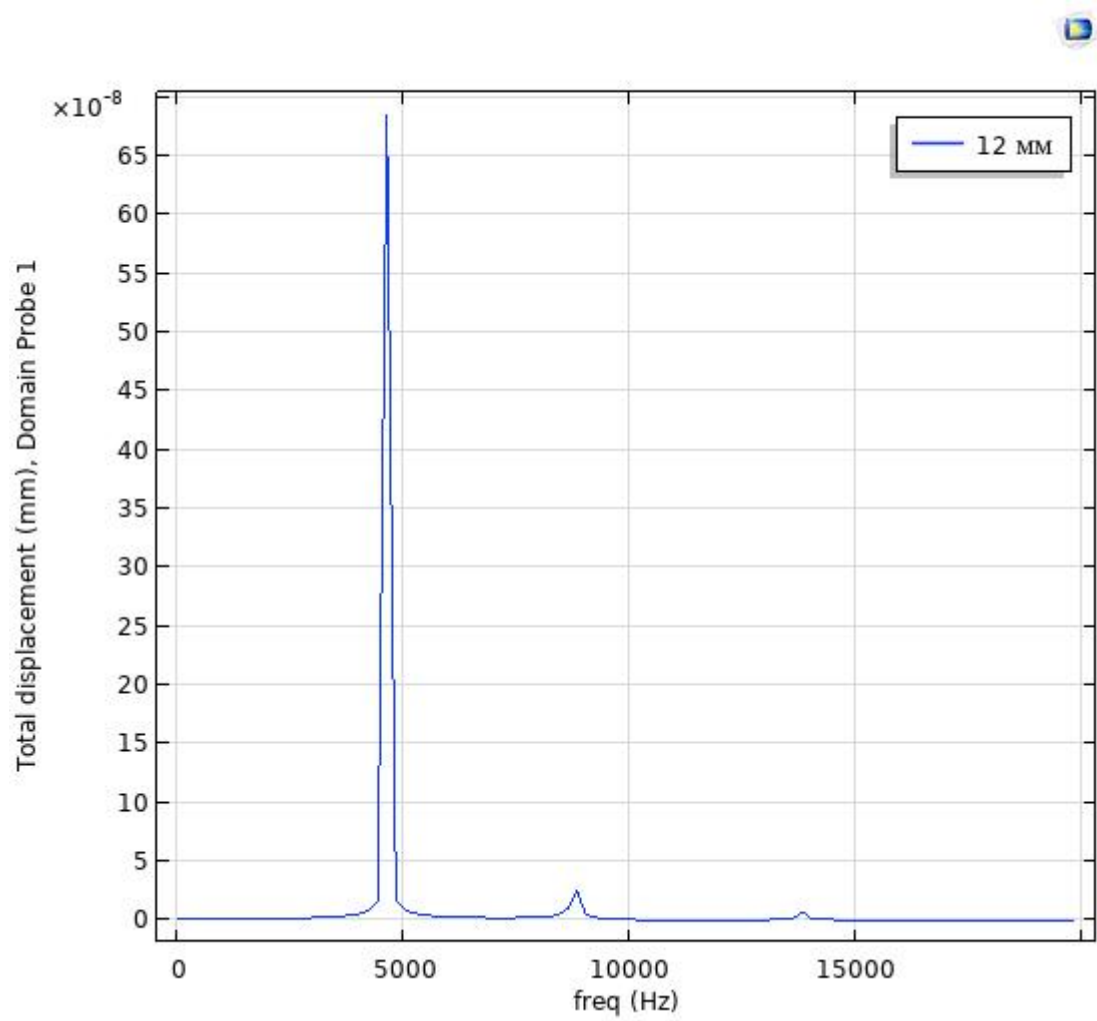
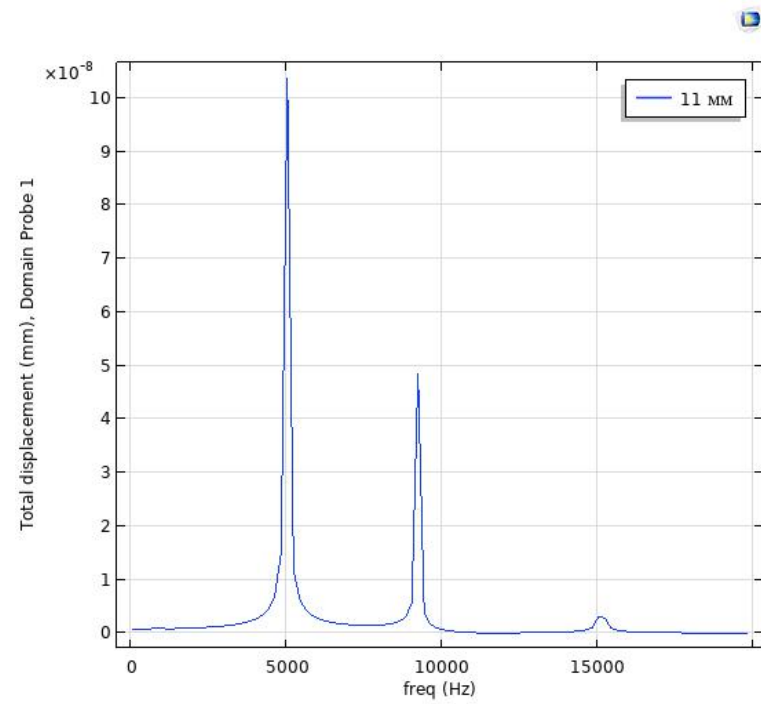
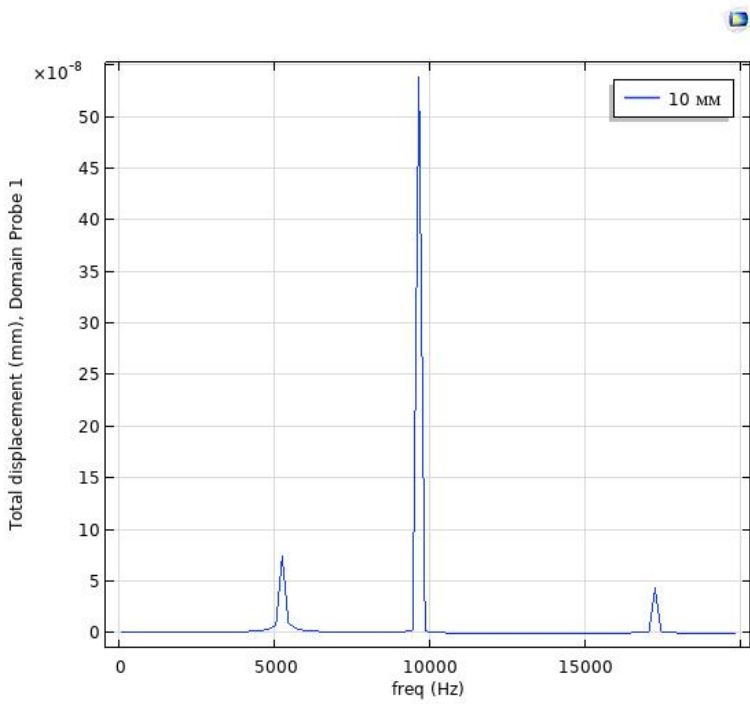
Останній рисунок відповідає довжині 12 мм

Оскільки 12мм довжина п'єзоелементу показала досить рівну АЧХ, то розглянемо характеристику більш детально відрізками 20 Гц – 3кГц / 5кГц – 7 кГц / 9 кГц – 15 кГц



3.5.2 Деформація пластини відносно її початкових розмірів у [mm]





Висновок

Отже, було переглянуто усі питання, які зазначалися у вступній частині роботи. Тобто, був створений базовий проект, який в подальшому процесі навчання буде модифікуватися (конструкція, широкий спектр матеріалів які будуть вибрані за передовими критеріями).

В експериментально-розрахунковій частині використовували програмний пакет COMSOL Multiphysics 5.5, який значно полегшує обрахунки різних фізичних процесів (програма має чудові заготовлені бібліотеки для дослідження акустичних процесів)

Шляхом комп'ютерного моделювання поміряли п'єзокерамічну пластину PZT-7A, габарити якої були 12 мм/2мм/0.2 мм (довжина, ширина, висота(товщина) відповідно) . Перед тим, як визначити найбільш вдалу модель для дослідження, ми досліджували, яка з довжин пластини покаже себе краще за інші. Досліджували пластини 6-12 мм (крок 1 мм), і експериментальним шляхом побачили, що візуально АЧХ 12 мм-трової пластини має найрівніший вигляд, але це вплинуло на рівень деформації (найвижчий серед інших зразків). Тому це дає підставу для зміни конструкторської в першу чергу, та збільшення динаміки вибору габаритів п'єзоелемента.

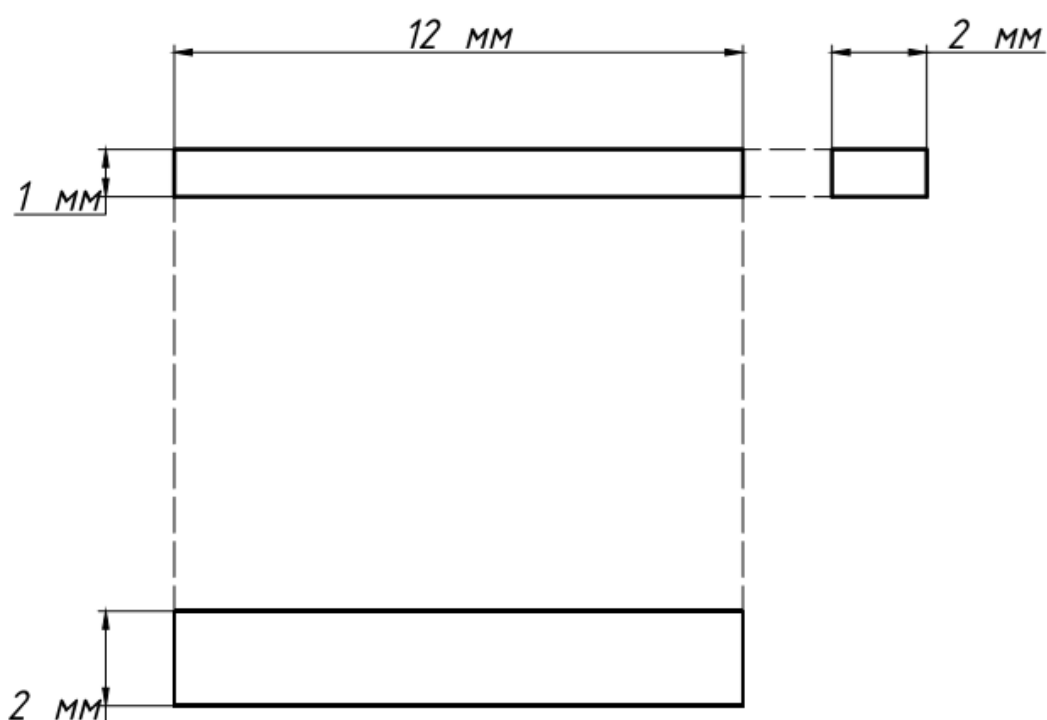
Інформація з цієї роботи дасть необхідну базу, для використання у навчальних дослідженнях.

Література

1. Микрофоны и их применение - Эфрусси М.М. 1974 год 8с.
 2. [URL]uk.wikipedia.org/wiki/Мікрофон
 3. Хрестоматия радиолюбителя, Госэнергоиздат, 1961г.
 4. [URL]<http://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/2270-kak-rabotaet-mikrofon-raznovidnosti.html>
 5. [URL]uk.wikipedia.org/wiki/П%27езоефект
 6. [URL]<https://chipinfo.pro/elements/acoustics/microphones.shtml#Capacitor>
 7. Кэпп У., Пьезоэлектричество и его практическое применение
 8. Жеребцов И.П. Радиотехника Издание 5
 9. <https://www.britannica.com/technology/electromechanical-transducer#ref527401>
 10. [URL]<https://dinamikservis.ru/blog/mikrofony/kondensatornyy-mikrofon/>
 11. [URL]<https://getsound.store/blog/whatiscondenser/>
 12. [URL] <http://audioakustika.ru/node/1166>
 13. [URL]<http://audioakustika.ru/node/1167>
 14. [URL]<https://www.matematicus.ru/svyaz/printsip-raboty-ugolnogo-mikrofona>
 15. [URL]uk.wikipedia.org/wiki/Електрети
 16. [URL]<https://whatis.techtarget.com/definition/electret-microphone>
 17. [URL]<http://audioakustika.ru/node/1164>
 18. М. А. Сапожков. Акустика. — М. : Радио и связь, 1989
 19. Сапожков М. А. Электроакустика. Учебник для вузов. М., «Связь»
 20. http://argoasecurity.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=263
 21. [URL]<https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/pzt.html>
 22. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В.
- Исполнительные устройства и системы для микроперемещений.- СПб ГУ ИТМО, 2011.- 131 с.
23. Epla Piezo Datasheet
 24. [URL]<http://yoursoundpath.com/library/capsules/>

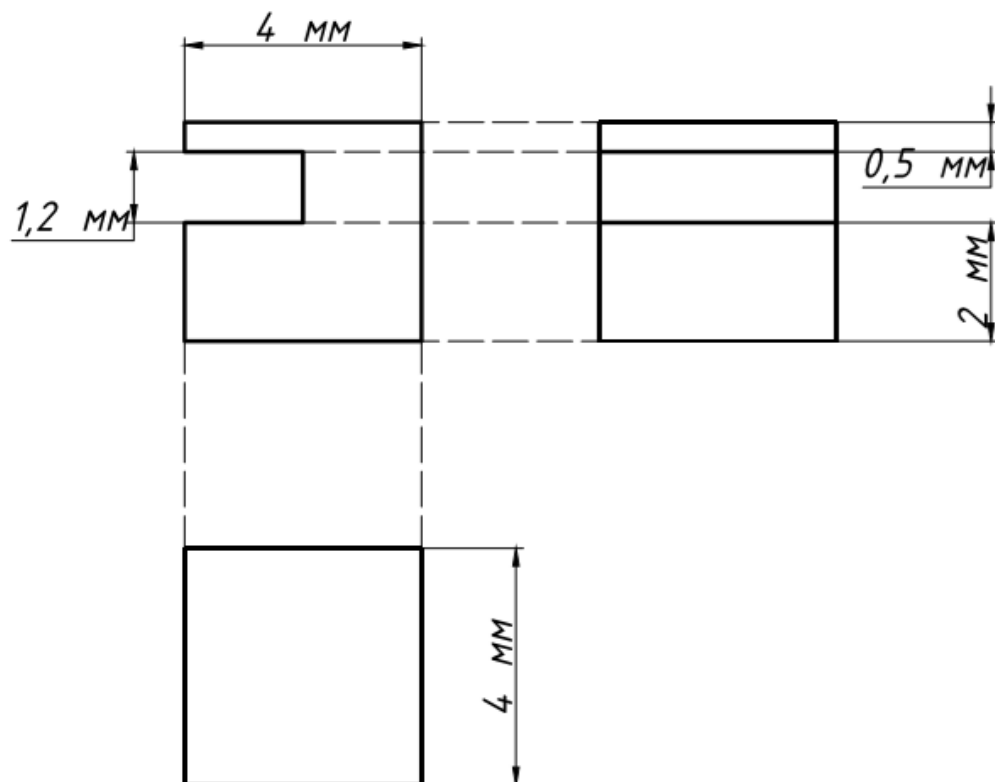
Technical drawing of a mechanical part, likely a spring, showing dimensions: 12 mm, 2 mm, and 0,2 mm. The drawing includes a side view and a cross-sectional view.

45

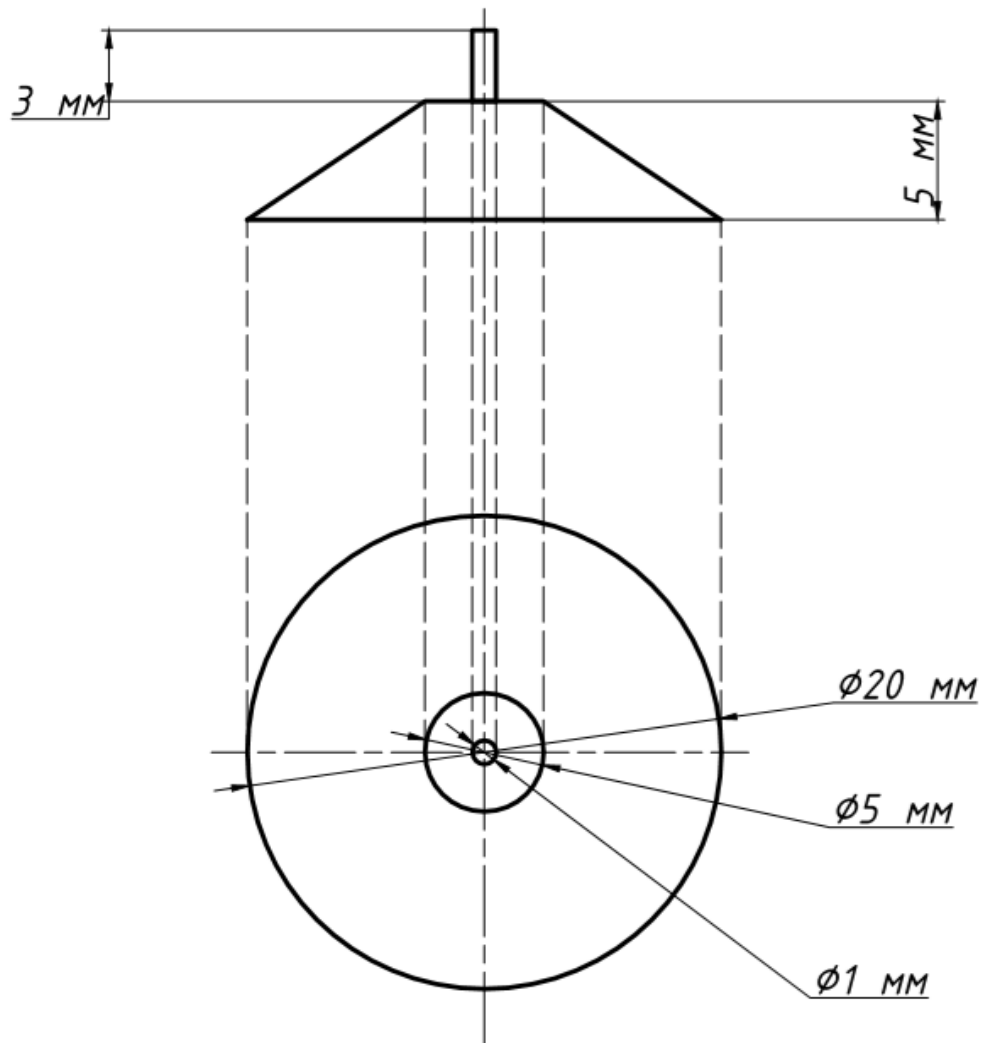


	№ докум.	Підп.	Дата	Літ.		Маса	Масштаб
Розроб.	Боголюбов І.А.						1:8
Перев.	Богданов О.В.			Аркуш			
Т.контр.							
Н.контр.				ДГ-261-1 ФЕЛ			
Затв.							
				Сталь			

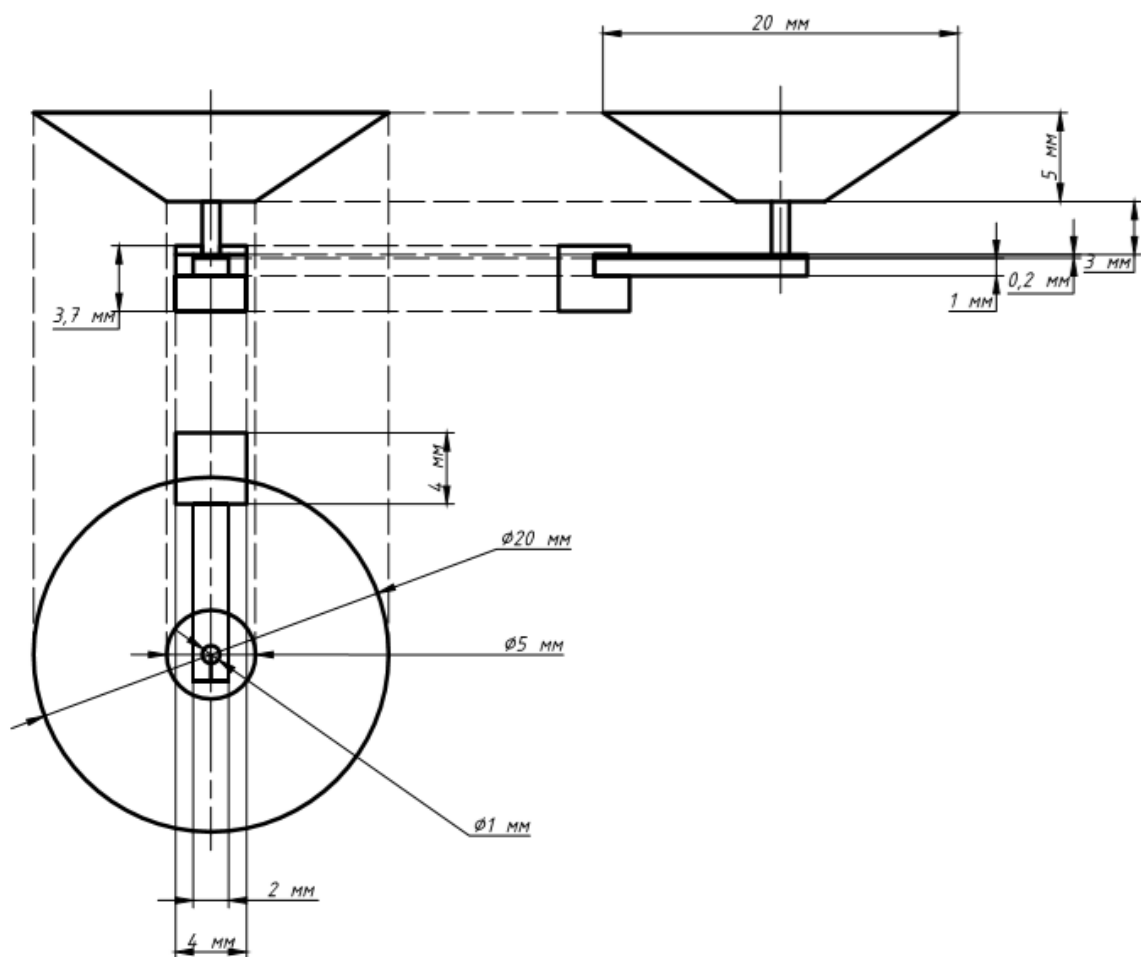
Додаток 3



	№ докум.	Підп.	Дата	Анкер		Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Боголюбов І.А.							1:10
Перев.	Богданов О.В.			ДГ-261-1 ФЕЛ		Аркуш		
Т.контр.						Сталь		
Н.контр.								
Затв.								



	№ докум.	Підп.	Дата				Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Боголюбов І.А.			Мембрана					1:4
Перев.	Богданов О.В.								
Т.контр.									
Н.контр.									
Затв.									
				ДГ-261-1 ФЕЛ			Алюміній		
							Аркуш		



	№ докум.	Підп.	Дата	<i>Стенд</i>		Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Боголюбов І.А.							1:3
Перев.	Богданов О.В.			<i>ДГ-261-1 ФЕЛ</i>		<i>Аркуш</i>		
Т.контр.						<i>Сталь, Алюміній, ПЗТ-7</i>		
Н.контр.								
Затв.								