

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
(м. Сєверодонецьк)

Факультет Інформаційних технологій та електроніки  
(повне найменування факультету)

Кафедра Програмування та математики  
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до дипломної роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня магістр  
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

спеціальності 171 – Електроніка  
(шифр і назва спеціальності)

на тему Дослідження режимів роботи та характеристик п'єзотрансформа-  
торів

Виконав: студент групи Ел-13м

Проніна В.Ю.  
(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник Паєранд Ю.Е.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Завідувач кафедри Лифар В. О.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент Самойлова Ж.Г.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
(м. Сєвєродонецьк)

Факультет Інформаційних технологій та електроніки

Кафедра Програмування та математики

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Спеціальність 171 – Електроніка  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.О.Лифар

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 року

З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Проніной Вікторії Юріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження режимів роботи та характеристик п'єзотрансформаторів

керівник проекту (роботи) Паєранд Юрій Едуардович к.т.н., професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “21” листопада 2018 року № 245/48

2. Строк подання студентом роботи 15.01.2019

3. Вихідні дані до роботи Матеріали науково-дослідної практики

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Аналіз питання та постановка задачі;

2) Дослідження характеристик і порівняльний аналіз роботи одношарових і багатошарових п'єзотрансформаторів;

3) Розробка моделі п'єзотрансформатора для визначення його основних характеристик;

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Дата видачі завдання 01.09.2018

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Актуальність теми і постановка завдань дослідження.	03.09.18-10.09.18	
2	Аналіз розробок та досліджень	11.09.18-30.09.18	
3	Огляд та вибір методів дослідження п'єзотрансформаторів	01.10.18-14.10.18	
4	Експериментальні дослідження одношарових і багатошарових п'єзотрансформаторів	15.10.18-30.11.18	
5	Розробка моделі п'єзотрансформатора для визначення його основних характеристик	01.12.18-20.12.18	
6	Узагальнення результатів. Висновки	21.12.18-31.12.18	
7	Оформлення пояснювальної записки	01.01.19-15.01.19	

Студент Проніна В.Ю.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) Паєранд Ю.Е.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	7
1.1 Огляд основних типів і конструкцій п'єзотрансформаторів.....	7
1.2 Принцип роботи п'єзотрансформаторів .....	19
1.3 Характеристики п'єзоелектричних матеріалів і п'єзотрансформаторів на їхній основі .....	22
1.3.1 Параметри п'єзоелектричних матеріалів і п'єзотрансформаторів .....	22
1.3.2 Різновиди п'єзоелектричних матеріалів .....	27
1.4 Висновки за розділом .....	32
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ОДНОШАРОВИХ І БАГАТОШАРОВИХ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРІВ .....	34
2.1 Методи дослідження п'єзотрансформаторів.....	34
2.1.1 Методи визначення параметрів п'єзоелектричних матеріалів і елементів.....	36
2.1.2 Методи визначення характеристик п'єзотрансформаторів...	46
2.1.3 Еквівалентна схема п'єзотрансформатора.....	55
2.2 Дослідження характеристик одношарових і багатошарових п'єзотрансформаторів.....	65
2.3 Висновки за розділом.....	82
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК .....	85
3.1 Розробка моделі п'єзотрансформатора .....	85
3.2 Висновки за розділом.....	95
ВИСНОВКИ.....	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	100

## ВСТУП

П'єзотрансформатори виконують різні функції. Вони можуть перетворювати опір ланцюга, підсилювати сигнал по напрузі і струму, інвертувати фазу вхідного сигналу і, крім того, володіють ще рядом функціональних властивостей, що дозволяють знайти їм застосування не тільки в якості пасивних, але й активних елементів схем [1].

П'єзоелектричні трансформатори мають наступні переваги в порівнянні з електромагнітними трансформаторами:

- високий коефіцієнт трансформації і ККД понад 95 % (у деяких випадках 99 %);
- високу гальванічну розв'язку;
- хорошу ізоляцію і незаймистість;
- відсутність електромагнітних перешкод і нечутливість до електромагнітних полів;
- можливість роботи на високих частотах.

Однак п'єзотрансформатори заслуговують на увагу інженерів, насамперед тим, що на їхній основі можлива розробка малогабаритних вторинних джерел живлення. У зв'язку з мініатюризацією радіоелектронної апаратури, широким використанням інтегральних схем особливо важливої є проблема зменшення розмірів і маси вторинних джерел живлення, на частку яких приходить до 50-80 % обсягу і маси сучасної апаратури. Найбільш громіздкими елементами вторинних джерел живлення є трансформатори і фільтри. Робоча частота існуючих перетворювачів не перевищує 50 кГц, а для трансформації напруги використовуються електромагнітні трансформатори. Одним із способів зменшення розмірів вторинних джерел живлення є збільшення робочої частоти перетворювачів, що дозволяє зменшити розміри трансформатора і фільтрів. Це, у свою чергу, вимагає створення трансформаторів струму і напруги з високим ККД, які могли б працювати на високих частотах. На цих

частотах з високим ККД можуть працювати п'єзоелектричні трансформатори.

В останні роки за кордоном проводилися дослідження можливості використання п'єзотрансформаторів у різних пристроях живлення люмінесцентних ламп. Імовірно, п'єзотрансформатори знайдуть широке застосування при створенні мініатюрних пристроїв запалювання і систем живлення ламп наступного покоління завдяки своїм характеристикам (мінімізація конструктивних рішень, малі шуми, можливість роботи на високих частотах більш 500 кГц) [2].

Подальший розвиток техніки спричинив розробки в області подальшої мініатюризації п'єзотрансформаторів та покращення його електричних характеристик. Одним з недоліків п'єзоелектричних трансформаторів напруги є їх мала вихідна потужність (одиниці ват), що обмежує їх область застосування навіть в малопотужній електроніці. С такими цілями були створені багатшарові п'єзотрансформатори.

Вибір п'єзотрансформатора для конкретного пристрою, визначається його основними характеристиками, до яких відносяться амплітудно-частотні, фазо-частотні характеристики й інші залежності. Тому в плані вивчення п'єзотрансформатори представляють собою особливий інтерес.

## 1 ПЕРШИЙ РОЗДІЛ

### АНАЛІЗ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

#### 1.1 Огляд основних типів і конструкцій п'єзотрансформаторів

П'єзоелектричні трансформатори відносяться до класу виробів електронної техніки, в основі дії яких лежить п'єзоелектричний ефект.

Конструкція п'єзотрансформатора зображена на рисунку 1.1. Частина п'єзотрансформатора, що підключається до джерела електричного сигналу, називається збудником (1), а частина, що підключається до навантаження - генератором (2).

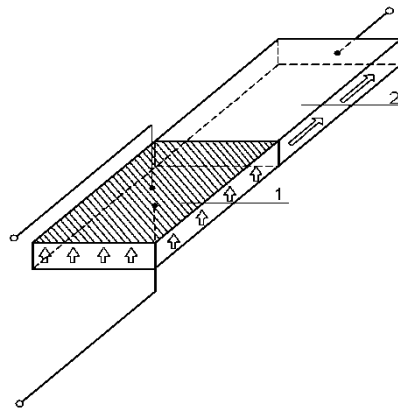


Рисунок 1.1 – Конструкція п'єзоелектричного трансформатора

Зовнішній вигляд п'єзоелектричних трансформаторів представлений на рисунку 1.2.

Принцип дії п'єзотрансформатора полягає у використанні явища зворотного п'єзоєфекта в секції збудника і прямого п'єзоєфекта в секції генератора.

За типом коливань п'єзоелектричні трансформатори підрозділяють на трансформатори із збудженням коливань подовжніх, поперечних, зсуву і вигину. Дані коливання умовно зображені на рисунку 1.3.



Рисунок 1.2 - Зовнішній вигляд п'єзоелектричних трансформаторів

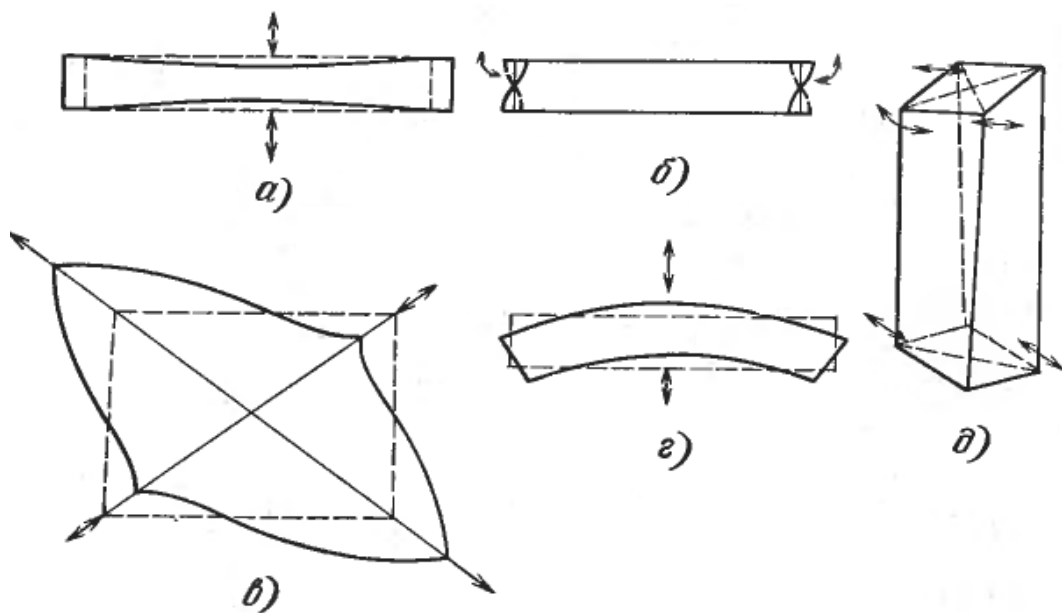


Рисунок 1.3 - Характер механічних коливань п'єзоелемента

- a)* подовжні коливання; *б)* поперечні коливання; *в)* коливання зсуву;  
*г)* коливання вигину; *д)* коливання крутіння

Подовжні коливання (стиску-розтягання) (рисунок 1.3, *a*) відбуваються по довжині пластини. Частоту коливань у цьому випадку визначає довжина п'єзоелемента. Поперечні коливання це коливання зсуву по товщині (рисунок 1.3, *б*), тут частоту коливань визначає товщина елемента. Коливання зсуву



по контуру - по грані в площині коливань (рисунок 1.3, *в*). У даному випадку частоту коливань визначає контурний розмір. Коливання вигину - відбувається вигин елементів у площині коливань по грані товщині в різних площинах (рисунок 1.3, *з*). Коливання, що відбуваються у п'єзоелементі з чотирма електродами, це коливання крутіння (рисунок 1.3, *д*). Вид коливань визначається зрізом, числом електродів і їхнім розташуванням.

П'єзотрансформатори з коливанням зсуву і вигину знайшли застосування як функціональні елементи при передачі малих рівнів електричних сигналів, п'єзотрансформатори з коливанням зсуву в області частот від 0,5 МГц і вище; з коливанням вигину в низькочастотній області - до одиниць кілогерців [3].

Відомі два способи електромеханічного перетворення енергії подовжніх хвиль: подовжній і поперечний. Поперечне чи подовжнє перетворення енергії може здійснюватися як у збуднику, так і в генераторі.

Якщо до п'єзоелектричної пластини з електродами на протилежних сторонах прикласти електричну напругу, то на кінцях пластини виникнуть сили стиску і розширення. Виникаючи при цьому сили породжують акустичну хвилю, яка зображена на рисунку 1.4, *а*. Ця хвиля поширюється в подовжньому напрямку і досягає протилежного кінця пластини. Потім вона відбивається від нього, не змінюючи фази, і направляється назад до лівого кінця пластини, відбивається від нього і т.д. доти, поки за рахунок механічних і електричних втрат у пластині хвиля не загасне.

При стиску (чи розширенні) зсув часток відбувається в тому ж напрямку, у якому відбувається поширення хвилі. Такі хвилі називаються подовжніми на відміну від поперечних, у яких зсув часток перпендикулярно напрямку їхнього поширення.

У розглянутому випадку напрямок електричного поля направлений перпендикулярно напрямку поширення хвилі. Можливий також випадок, коли електроди розташовані на торцях п'єзопластини. Тоді напрямок електричного поля направлений паралельно напрямку поширення хвилі. Відповідно

до цього розрізняють поперечний і подовжній способи збудження подовжніх чи коливань хвиль.

При накладенні всіх падаючих і відбитих хвиль у п'єзопластині виникає стояча хвиля, яка представлена на рисунку 1.4,б. Амплітуда зсувів у такій хвилі максимальна тоді, коли на довжині п'єзопластини укладається ціле число напівхвиль. Ця умова виконується для визначених частот збудження п'єзопластини, названих резонансними [4].

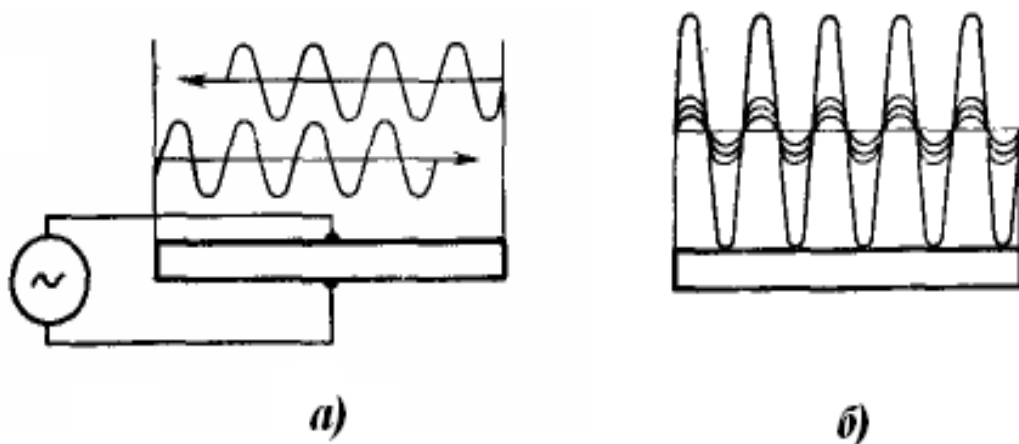


Рисунок 1.4 - Розподіл деформацій уздовж п'єзоелемента.

а) акустичні хвилі; б) стояча хвиля

На рисунку 1.5 приведені варіанти конструкцій п'єзотрансформаторів, де стрілками показаний напрямок поляризації.

Комбінації різних способів електромеханічного перетворення енергії подовжніх хвиль дає три основних, елементарних конструкцій п'єзоелектричних трансформаторів: подовжньо-подовжню, поперечно-подовжню чи, при зворотному включенні, подовжньо-поперечну і поперечно-поперечну.

Поперечно-поперечна і подовжньо-подовжня конструкції, є симетричними. Коефіцієнт трансформації таких конструкцій не залежить від розмірів.

Поперечно-подовжня конструкція є несиметричною. Загальний коефіцієнт трансформації залежить від геометричних розмірів, тому дана конструкція становить найбільший інтерес [1].

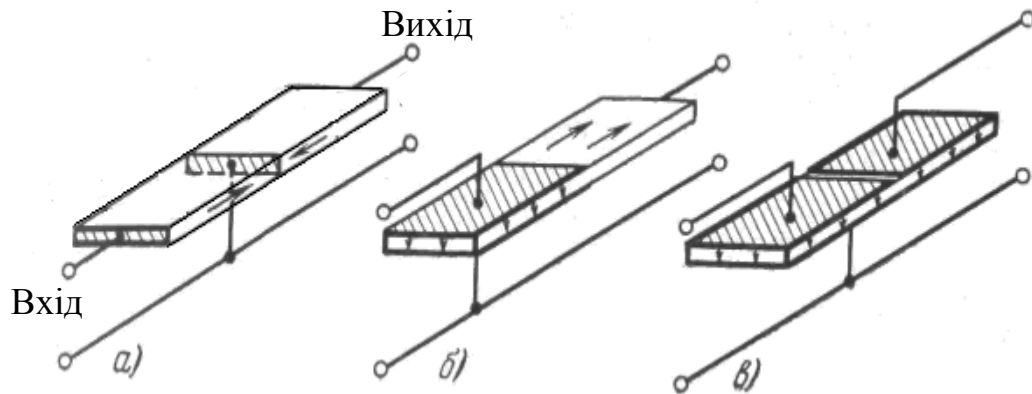


Рисунок 1.5 - Елементарні конструкції п'єзотрансформаторів

а) подовжньо-подовжня; б) поперечно-подовжня;

в) поперечно-поперечна

Уперше конструкція поперечно-подовжнього типу була запропонована Розеном. Тому її часто називають також конструкцією Розена. П'єзотрансформатори такого типу ефективно працюють як на основний, так і на другій гармоніці власного механічного резонансу [5]. На рисунку 1.6,*а* показані розподіл внутрішніх механічних деформацій і зсув окремих частин п'єзоелемента для п'єзотрансформатора конструкції Розена. На рисунку 1.6,*б* зображений п'єзотрансформатор поперечно-подовжнього типу. Він має симетрично розташовану щодо центра п'єзопластини генераторну секцію і дві секції збудження, дві частини генераторної секції, які поляризовані в протилежних напрямках. Як впливає з епюр розподілу деформацій, такі п'єзотрансформатори ефективно працюють на непарних гармоніках [3].

У залежності від призначення п'єзотрансформатори розділяють на підвищувальні (високовольтні, трансформатори напруги) і понижуючі (трансформатори струму).

П'єзоелектричні трансформатори з генератором подовжнього типу називають п'єзоелектричними трансформаторами напруги. Максимальна напруга на виході генератора п'єзотрансформатора визначається відстанню між

електродами генератора і напругою, яку можна одержати з одиниці довжини п'єзоелектричного матеріалу [1]. Сучасні п'єзоелектричні матеріали на основі твердих розчинів цирконата-титаната свинцю системи ЦТС дозволяють одержувати 50 - 300 В напруги з кожного міліметра довжини генератора. Таким чином, для п'єзоелектричного матеріалу з питомою напругою 100 В/мм при довжині генератора 10 мм напруга на його обкладинках буде дорівнювати 1000 В, а для генератора довжиною 100 мм - 10000 В. Тому в якості високовольтних п'єзоелектричних трансформаторів напруги використовують конструкції з генераторами подовжнього типу в яких відстань між електродами максимальна, а отже, максимальна напруга на виході трансформатора.

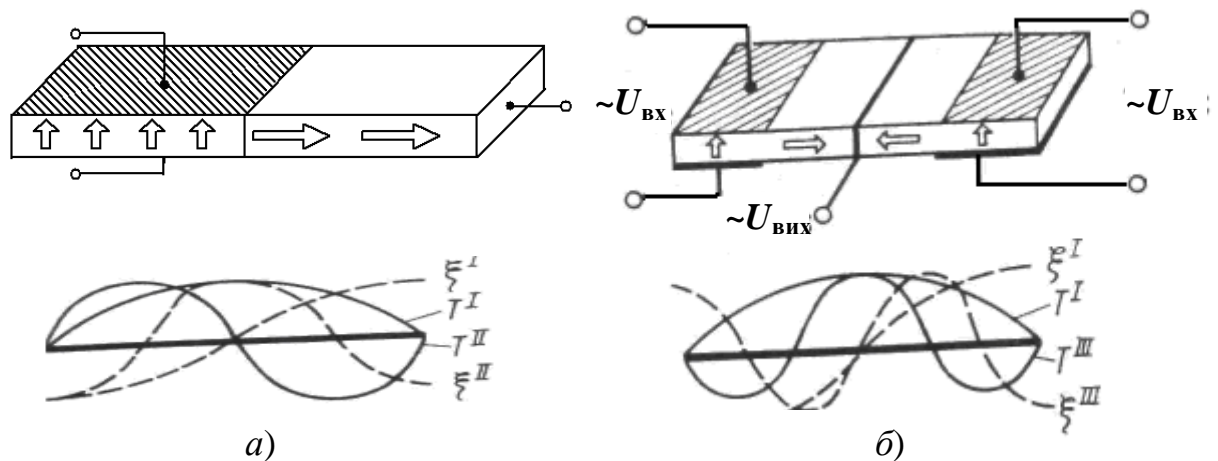


Рисунок 1.6 - П'єзоелектричні трансформатори поперечно-подовжнього типу

Крім того, для п'єзоелектричних трансформаторів напруги із генератором подовжнього типу характерні високі значення вихідних опорів, які для більшості конструкцій перевищують сотні кілоом. Цим і обумовлено те, що донедавна всі п'єзоелектричні трансформатори відносили до п'єзоелектричних трансформаторів напруги, тобто до приладів, на виході яких важко одержати струми більш 1 мА. Останнім часом розроблені конструкції п'єзоелектричних трансформаторів із вихідними струмами до 10 А. З огляду на їхні конструктивні особливості і нові вимоги, які до них пред'являються, вони були названі п'єзоелектричними трансформаторами струму.

Розподіл п'єзоелектричних трансформаторів на трансформатори напруги і струму достатньо умовне. Так до п'єзоелектричних трансформаторів струму умовно відносять конструкції з коефіцієнтом трансформації менш 10, які працюють при порівняно великих вхідних і вихідних струмах. Необхідність у розробці таких трансформаторів з'явилася в зв'язку з рішенням проблеми зменшення розмірів і маси низьковольтних вторинних джерел живлення [6].

Відомі також вузькополосні і широкополосні п'єзоелектричні трансформатори. Робочі частоти вузькополосних трансформаторів вибираються в околиці однієї з частот механічного резонансу, тобто в тій області частот, де коефіцієнт трансформації досягає максимальної величини. Для широкополосних конструкцій п'єзоелектричних трансформаторів коефіцієнт трансформації в режимі холостого ходу має постійне значення від нуля до першої частоти механічного резонансу. Такі трансформатори застосовують у якості імпульсних і елементів пам'яті запам'ятовуючих пристроїв [7].

Конструкції п'єзоелектричних трансформаторів визначаються умовами їхнього застосування. П'єзотрансформатори можуть бути виконані у виді пластини, стержня, циліндра чи диска.

Прикладом п'єзотрансформатора у вигляді пластини є конструкція, зображена на рисунку 1.6,а. П'єзотрансформатором подовжньо-подовжнього типу є конструкція, яка зображена на рисунку 1.7. Такий п'єзотрансформатор являє собою стержень з п'єзокерамики з нанесеними кільцевими електродами із подовжньою поляризацією міжелектродних областей. При збудженні подовжніх коливань у стержні напрямом поширення пружних хвиль і напрямом поляризації збігаються. Особливістю таких п'єзотрансформаторів є мінімальна реактивна складова повного вхідного опору і велике його значення. Коефіцієнт трансформації значно нижче, ніж у п'єзотрансформаторів поперечно-подовжнього типу.

Для перетворення підвищеної потужності найбільш оптимальними є п'єзотрансформатор із п'єзоелементом у вигляді циліндра, який зображений на рисунку 1.8. Він відрізняється високою міцністю при роботі в сильних динамічних полях і моночастотністю амплітудно-частотних характеристик. У них використовуються радіальні коливання циліндра.

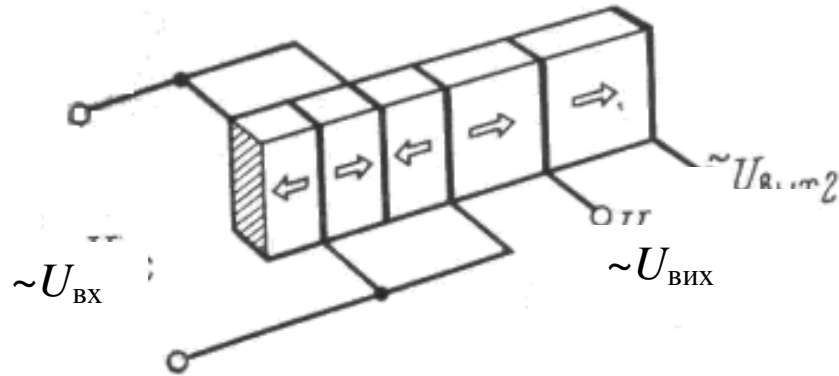


Рисунок 1.7 - П'єзотрансформатор з п'єзоелементом у вигляді стержня

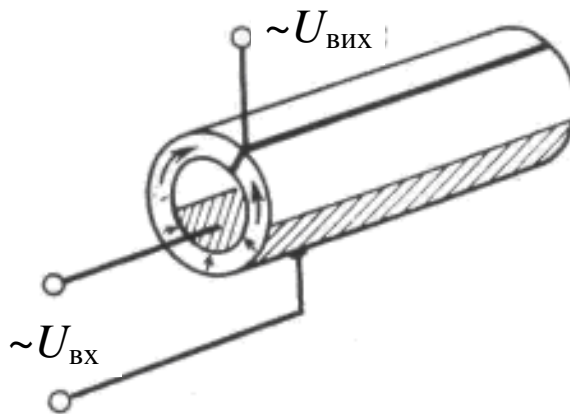


Рисунок 1.8 - П'єзотрансформатор з п'єзоелементом у вигляді циліндра

Дисковий трансформатор зображений на рисунку 1.9 . При збудженні на радіальній моді коливання потік енергії через циліндрову поверхню зали-

шається незмінним для будь-якого радіусу, і, отже, в центрі диска відбувається концентрація енергії. Якщо генераторну секцію трансформатора розташувати в центрі диска, відбувається додаткове підвищення коефіцієнта трансформації за рахунок концентрації енергії.

Дискові трансформатори зазвичай застосовують як перетворювачі імпедансу. Для ефективного збудження на частоті першого обертопу лінія розділу електродів повинна проходити по колу діаметром, рівним 0,45 діаметра диска. Зменшення товщини трансформатора приводить до збільшення коефіцієнта трансформації.

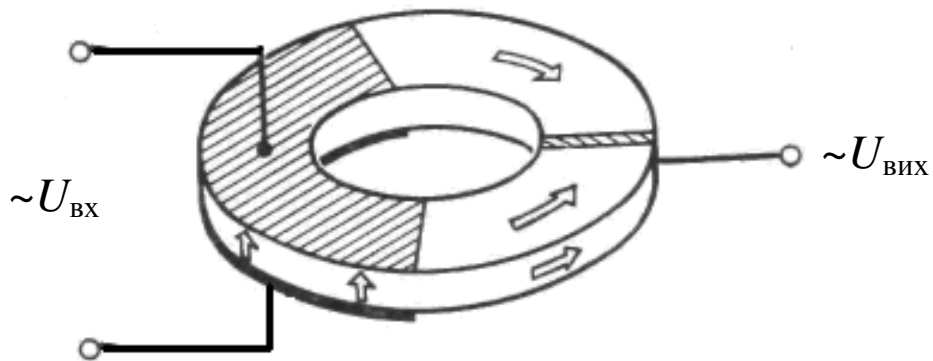


Рисунок 1.9 - Трансформатор напруги з дисковим п'єзоелементом

Трансформатори напруги з циліндричними чи дисковими п'єзоелементами можна віднести до поперечно-подовжнього типу (дві аксіально поляризовані генераторні секції з загальним кільцевим вихідним електродом) [8].

Недоліком п'єзотрансформатора напруги є невелика вихідна потужність. Отже, є цікавою ідея паралельного з'єднання декількох перетворювачів. На рисунку 1.10 представлений один із варіантів такого з'єднання. Дана конструкція п'єзотрансформатора дозволяє одержати потужність більш 20Вт, при розмірах зразка  $7 \times 8 \times 19$  мм [9].

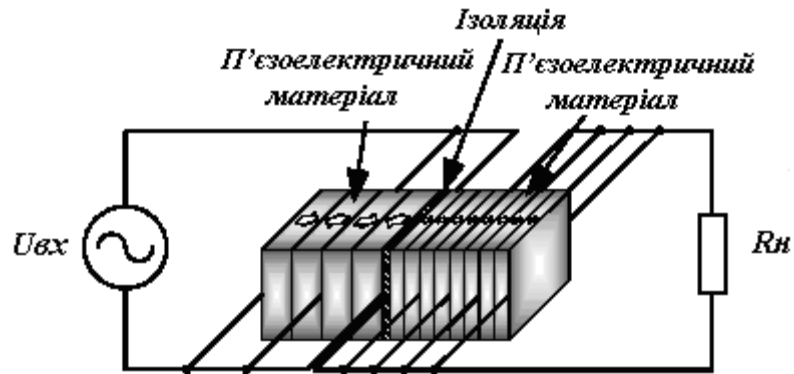


Рисунок 1.10 - З'єднання декількох перетворювачів для підвищення потужності пристрою

З такою метою були розроблені принципово нові конструкції п'єзотрансформаторів - багат шарові. Конструкція багат шарових п'єзотрансформаторів складається з тонких шарів, що змінюють один одного, (п'єзокераміка товщиною 100-200 мкм) і електродів. Дана конструкція дозволяє забезпечити високу щільність потужності п'єзотрансформатора (до 40-50 Вт/см<sup>2</sup>), і, відповідно, зменшити габарити в 3-5 разів у порівнянні з традиційним одношаровим п'єзотрансформатором, а також дозволяє працювати на низкоомне навантаження з високим ККД [10]. В основному багат шаровим робиться збудник. Конструкція багат шарового п'єзотрансформатора представлена на рисунку 1.11.

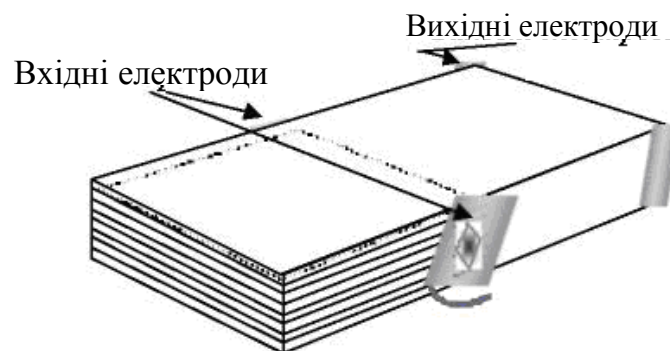


Рисунок 1.11 - Конструкція багат шарового п'єзотрансформатора



Так ще в 1968 році був запатентований метод виготовлення багатошарових п'єзотрансформаторів. Сутність запропонованого способу виготовлення багатошарових п'єзотрансформаторів полягає в наступному. Заготівля секції генератора виконується шляхом пресування шихти в пресформі. Пластини секції збудника набираються з тонких керамічних плівок, отриманих по способу розливу шлікера з органічною рідиною (5-10% водяного розчину полівінілового спирту). Товщина плівок залежить від в'язкості шлікера і може регулюватися від 15-50 мкм.



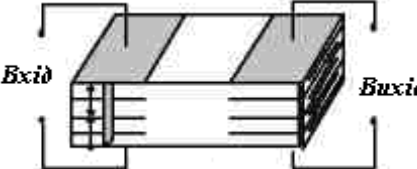
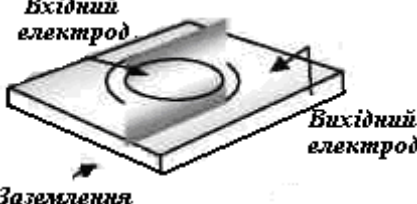

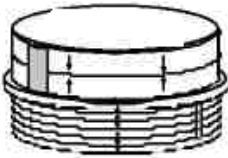
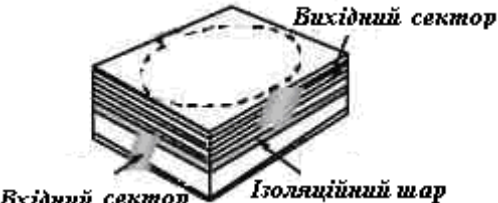
Спосіб виготовлення багатошарових п'єзотрансформаторів, заснований на виготовленні секцій збудження з окремих пластин з наступним акустичним з'єднанням секцій, який відрізняється тим, що, з метою збільшення коефіцієнта трансформації, корисної потужності і гранично припустимих напруг, пластини секції збудження виготовляють з необпаленого п'єзоматеріала шляхом розливу шлікера на підкладку, а акустичне з'єднання секцій роблять одночасно з вжиганням електродів шляхом пресування пакетів із заготівель секцій при температурі спікання кераміки. Можливість багатосерійного виготовлення багатошарових п'єзотрансформаторів з'явилась тільки в останні роки [11].

Багатошарові п'єзотрансформатори доцільно використовувати для збільшення потужності і для забезпечення нормального теплового режиму. У таблиці 1.1 представлені різні типи багатошарових п'єзотрансформаторів [12].

Багатошарові конструкції більш трудомісткі у виготовленні, значення тангенса діелектричних втрат ( $\text{tg } \delta$ ) у них збільшено в 2-3 рази в порівнянні з  $\text{tg } \delta$  п'єзоматеріала, відповідно і вартість таких п'єзотрансформаторів зростає. Тому для збільшення потужності може бути також використане послідовно-паралельне з'єднання п'єзотрансформаторів [13, 14].

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що вибір виду конструкції п'єзотрансформатора визначається в основному вимогами до його вхідних і вихідних електричних параметрів, а також до інших характеристик, таких як, стабільність параметрів, міцність, діапазон частот, температурна стабільність, вартість і т.д.

Таблиця 1.1 - Різні конструкції багатошарових п'єзотрансформаторів

Конструкція	Тип коливання	Резонансні частоти	Виробник
1	2	3	4
 <p>Вихідний сектор Бхідний сектор Ізоляційний шар</p>	по товщині	1 МГц	Японія
 <p>Вхідний сектор Вихідний сектор Ізоляційний шар</p>	по довжні	50-150 кГц	Японія
 <p>Вхід Вихід</p>	по довжні	50-150 кГц	Японія
 <p>Вхідний електрод Вихідний електрод Заземлення</p>	контурні	50-150 кГц	Корея
 <p>Вхідний електрод Вихідний електрод</p>	по товщині	400 кГц	Європа
	радіальні	50-250 кГц	США
 <p>Вихідний сектор Бхідний сектор Ізоляційний шар</p>	контурні	50-250 кГц	Японія

З трьох елементарних конструкцій особливий практичний інтерес представляє поперечно-подовжня. Унаслідок залежності коефіцієнта трансформації від співвідношення розмірів коефіцієнт трансформації цієї конструкції може дорівнювати декільком тисячам. Це більше чим у 10 разів перевищує коефіцієнт трансформації симетричних п'єзоелектричних трансформаторів напруги.

Великий інтерес представляє конструкція багат шарового п'єзотрансформатора. Коефіцієнт трансформації такого п'єзотрансформатора перевищує коефіцієнт трансформації одношарового в кілька разів, однак розміри останнього значно перевищують розміри багат шарового. Також ця конструкція вирішує проблему невеликої вихідної потужності п'єзотрансформатора.

## 1.2 Принцип роботи п'єзоелектричних трансформаторів

В основі роботи п'єзотрансформаторів лежить п'єзоелектричний ефект.

П'єзоелектричний ефект, експериментально відкритий братами Кюрі в 1880-1881 р., полягає в появі різнойменних електричних зарядів  $q^+$ ,  $q^-$  на протилежних поверхнях п'єзоелемента при його деформації (прямой п'єзо ефект), або в деформуванні п'єзоелемента на величину  $S$  під дією прикладеного до нього електричного поля (зворотний п'єзо ефект). Розглянемо більш докладно це явище.

Для звичайних твердих тіл механічна напруга  $T$  викликає пропорційну деформацію  $S$ , механічна напруга  $T$  і  $S$  зв'язані співвідношенням  $T=Y \cdot S$ , де  $Y$  - модуль пружності. Виникаючий на поверхні п'єзопластини заряд пропорційний силі, тому має протилежні знаки при стиску і розтяганні. Взаємозв'язок електричної індукції  $D$  (чисельно рівної повному заряду  $Q$  на одиницю площі) і механічної напруги  $T$  можна записати у виді:

$$D=Q/A=d T, \quad (1.1)$$

де  $d$  - коефіцієнт пропорційності, що виражається в К/н.

При зворотному п'єзоелектричному ефекті відбувається деформація  $S$  (розширення чи стиск у залежності від знака полю) п'єзоелемента під дією прикладеного до нього електричного поля  $E$ :

$$S = d \cdot E, \quad (1.2)$$

де  $d$  - коефіцієнт пропорційності, що виражається в м/В.

Для обох ефектів коефіцієнт пропорційності являє собою п'єзоелектричний модуль  $d$ , чисельно однаковий в обох випадках:

$$d = D/T = S/E \quad (1.3)$$

В даний час відомо більш 1500 з'єднань, що володіють властивостями п'єзо ефекту. При цьому усі вони не мають центра симетрії в розподілі зарядів, що є необхідною умовою існування п'єзо ефекту [15].

З 32 класів кристалів тільки 20 не мають центра симетрії і є п'єзоелектриками (з них 10 класів піроелектрики, зокрема, сегнетоелектрики). П'єзо ефект може мати природний (у монокристалів - кварц та ін.) і штучний характер (у полікристалічних структур – п'єзокераміки, електретів - за рахунок поляризації зовнішнім електричним полем).

Найбільш сильними п'єзоелектричними властивостями володіють п'єзокерамічні матеріали, що до того ж мають цілий ряд і інші важливі переваги перед монокристалами

П'єзотрансформатори являють собою монолітні твердотільні конструкції, виконані саме з п'єзокераміки. Для одержання п'єзоелектричних властивостей п'єзотрансформатор поляризується при його розміщенні в сильному електричному полі.

П'єзоелектрична кераміка по фізичних властивостях це полікристалічний сегнетоелектрик, що представляє собою хімічну сполуку чи твердий розчин (порошок) зерен. По хімічному складу це складний оксид, що включає

іони двовалентного свинцю чи барію, а також іони чотирьохвалентного титана чи цирконію. Шляхом зміни основного співвідношення вихідних матеріалів і введення добавок синтезують різні склади п'єзокерамики, що володіють визначеними електрофізичними і п'єзоелектричними характеристиками. Найбільше поширення одержала група п'єзокерамічних матеріалів типу ЦТС (цирконата-титаната свинцю).

Процес перетворення вхідної електричної енергії можна представити у виді наступного ланцюжка перетворення:

$$U_{\text{вх}} \rightarrow E_{\text{вх}} \rightarrow S \rightarrow T \rightarrow D \rightarrow q \rightarrow U_{\text{вих}}.$$

Вхідна напруга  $U_{\text{вх}}$ , яка створює поле  $E_{\text{вх}}$ , за рахунок зворотного п'єзоефекту, викликає деформацію  $S$  діелектрика і відповідну їй механічну напругу  $T$ . Хвиля деформації і механічної напруги через пружні зв'язки надходить у генераторну секцію, де вона за рахунок прямого п'єзоефекту викликає зміну поляризації  $P$  чи індукції  $D$  діелектрика. Це у свою чергу через зміну заряду на виході електрода  $\Delta q$  приводить до зміни вихідної напруги  $\Delta U = \Delta q / C_{\text{вих}}$ , де  $C_{\text{вих}}$  - вихідна ємність генераторної секції. Процес перетворення протікає в режимі стаціонарного резонансного коливання, при якому забезпечується висока ефективність процесу [16].

Таким чином, виходить, що за допомогою подвійного перетворення електричної енергії в механічну і навпаки, передається енергія з входу на вихід п'єзотрансформатора. По такому принципі здійснюється робота п'єзотрансформатора. Оскільки механічна напруга в стоячій хвилі максимальна на частотах резонансу, те і коефіцієнт трансформації має максимальне значення на резонансних частотах. Отже, можна зробити висновок, що для ефективності роботи п'єзотрансформатора частота джерела живлення повинна бути близька до однієї з резонансних частот механічних коливань.

### 1.3 Характеристики п'єзоелектричних матеріалів і п'єзотрансформаторів на їхній основі

#### 1.3.1 Параметри п'єзоелектричних матеріалів і п'єзотрансформаторів

При проектуванні пристроїв на основі п'єзотрансформаторів необхідно знати параметри як п'єзотрансформатора, так і п'єзоелектричних матеріалів. Основні постійні, котрі характеризують якість п'єзокераміки, наведені нижче.

Найбільш важливими характеристиками п'єзоелектричних керамік є діелектрична проникність  $\varepsilon$ , діелектричні втрати ( $\operatorname{tg} \delta$  - тангенс кута діелектричних утрат), коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $k$  і механічна добротність  $Q_M$ .

Діелектричною проникністю характеризується здатність діелектрика поляризуватися в електричному полі. Відносна діелектрична проникність  $\varepsilon'/\varepsilon_0$  являє собою відношення індукованого в електричному полі заряду на обкладинках конденсатора, заповненого діелектриком, до заряду, індукованому в тім же полі на обкладинках такого ж конденсатора з вакуумним проміжком. Цю фізичну величину часто називають просто діелектричною проникністю і вважають безрозмірною. У звичайній системі MKS вона являє собою відношення проникності  $\varepsilon'$  (у фарадах на 1 м) до проникності вакууму  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Відносна діелектрична проникність може бути виміряна при постійному (нульовому) значенні механічної напруги  $T$ . У цьому випадку вона називається діелектричною проникністю механічно вільного зразка.

П'єзоелектричні кераміки, як правило, мають великі значення діелектричної проникності - від декількох сотень до декількох тисяч.

При подачі змінної напруги заряд, що з'являється на діелектрику, має як дійсну (синфазну), так і мниму (яка має зсув по фазі на  $90^\circ$ ) компоненти, викликані активним опором і втратами. Ці втрати, що виражаються відношенням зсунутої по фазі на  $90^\circ$  компоненти до синфазного компонента, на-

зиваються дисипативним фактором, чи діелектричними втратами. Ця величина, часто називана тангенсом кута втрат і позначається  $\operatorname{tg} \delta$ , яка також безрозмірна. У системі MKS  $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ , де  $\varepsilon''$  і  $\varepsilon'$  - мнима і діюча частини комплексної діелектричної проникності  $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$  [17].

Ефективність перетворення електричної енергії в механічну і навпаки характеризується квадратом коефіцієнта електромеханічного зв'язку  $k^2$ . Величина  $k^2$  показує, яка частка вхідної електричної енергії перетворюється в запасену в п'єзоелементі механічну і навпаки.

При деформуванні п'єзоелектрика йому передається механічна енергія, при приложенні електричного поля - електрична. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку є квадратний корінь з тієї частки механічної енергії, що перетвориться в електричну, чи навпаки. Інша енергія під час кожного циклу втрачається на пружний чи діелектричний гістерезис чи розсіюється.

У випадку, коли до елемента прикладене електричне поле, коефіцієнт  $k^2$  характеризує частку електричної енергії, перетворену в механічну енергію, чи частку механічної енергії, перетворену в електричну, коли до кристала чи кераміки прикладена механічна напруга. Ці залежності можуть бути представлені такими виразами:

$$k^2 = \frac{\text{Електрична енергія, яка перетворюється в механічну}}{\text{Підведена електрична енергія}} \quad (1.4)$$

$$k^2 = \frac{\text{Механічна енергія, яка перетворюється в електричну}}{\text{Підведена механічна енергія}}$$

Оскільки перетворення механічної енергії в електричну не може бути повним,  $k^2$  завжди менше одиниці і, отже,  $k$  також менше одиниці. Типові значення  $k$  для кварцу – 0,1; для кераміки титанату барію - 0,4; для кераміки

$\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$  - 0,5-0,7. Для кристала сегнетової солі поблизу верхньої точки Кюрі (+24°C)  $k$  має особливо високе значення, рівне 0,9 [18].

Треба відзначити, що ефективність роботи перетворювача визначається тільки квадратом коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Ефективність перетворення потужності навантаженим перетворювачем визначається величиною  $k^2/(k^2 + \text{tg } \delta)$ , де  $\text{tg } \delta$  - втрати на вході (для ультразвукових випромінювачів це діелектричні втрати).

Передача енергії від збудника до генератора залежить ще і від механічної добротності п'єзоматеріала  $Q_M$ , що характеризує втрати механічної енергії в резонаторі і визначається як відношення всієї механічної енергії, запасеної в п'єзоелементі до енергії механічних утрат за період коливань.

При застосуванні п'єзоелектричних матеріалів у пристроях з високою питомою потужністю, таких як п'єзотрансформатор, потрібно, щоб величина механічної добротності зберігала високі значення при великій напруженості полю збуджуючого сигналу. При цьому п'єзоелектричні параметри також повинні бути досить великі. Так аналіз експлуатаційних характеристик п'єзотрансформаторів показує, що одним з основних параметрів п'єзоелектричного матеріалу є п'єзодобротність  $k^2 \cdot Q_M$ , що зберігає високі значення в сильному магнітному полі.

Чим вище добуток  $k^2 \cdot Q_M$ , тим вище ККД п'єзотрансформатора. Механічна добротність, крім того, визначає і смугу пропускання п'єзотрансформатора у режимах холостого ходу і короткого замикання [1].

Важливим параметром будь-якого трансформатора є коефіцієнт передачі. Коефіцієнт, що характеризує посилення (ослаблення) сигналу на виході п'єзоелектричного трансформатора, правильно було б називати коефіцієнтом передачі. Однак прийнято цей параметр називати коефіцієнтом трансформації.



Коефіцієнт трансформації для п'єзоелектричних трансформаторів (на відміну від трансформаторів з магнітним сердечником) необоротний. Для намотувальних трансформаторів виконуються умови:

$$k_u = 1/k_i, \quad (1.5)$$

$$k'_u = 1/k''_u, \quad (1.6)$$

де  $k_u$  - коефіцієнт трансформації по напрузі;

$k_i$  - коефіцієнт трансформації по струму;

$k'_u$  і  $k''_u$  - коефіцієнти для прямого і зворотного включення.

Для п'єзоелектричних трансформаторів ці співвідношення майже не виконуються.

Зазначені відмінності вузькополосних п'єзоелектричних трансформаторів від намотувальних привели до умовного розподілу їх на п'єзоелектричні трансформатори напруги і струму [3].

Немаловажним параметром є резонансна частота п'єзотрансформатора. Як відомо, резонансна частота для подовжніх по довжині  $L$  коливань залежить від довжини резонатора і визначається формулою [1]:

$$f_p = m \cdot \frac{N}{L}, \quad (1.7)$$

де  $m$  - номер моди збуджених коливань;

$N$  - постійна частота п'єзокерамічного матеріалу;

$L$  - довжина п'єзотрансформатора.

Унаслідок цього його ККД і коефіцієнт трансформації по напрузі (струму) залежать від опору навантаження і робочої частоти. Ефективність перетворення електричної енергії в механічну і навпаки характеризується ко-

ефіцієнтом електромеханічного зв'язку п'єзокерамічних матеріалів, що був описаний вище.

Передача енергії від збудника до генератора також залежить і від механічної добротності п'єзоматеріала  $Q_M$ . Однак важливим параметром п'єзотрансформатора є не тільки механічна добротність, але і електромеханічна чи ефективна, добротність  $Q_E$ , що визначається як

$$Q_E = \frac{f_P}{\Delta f}, \quad (1.8)$$

де  $f_P$ - резонансна частота;

$\Delta f$  - різниця частот на рівні 0,707 максимальної величини коефіцієнта трансформації [1].

Інші параметри п'єзотрансформатора визначаються еквівалентною схемою заміщення трансформатора і будуть описані в другому розділі даної роботи.

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що параметри як п'єзоматеріалів, так і п'єзотрансформаторів є важливою складовою характеристики п'єзотрансформатора.

Вочевидь, найкращою єдиною характеристикою величини п'єзоелектричного ефекту є коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $k$ . Якщо для п'єзоелектричних кристалів коефіцієнти електромеханічного зв'язку є характеристиками матеріалу, то для кераміки вони залежать від ступеня поляризації. Ці величини служать безрозмірними характеристиками п'єзоелектричного ефекту і дуже зручні як "показники якості".

Для п'єзотрансформаторів важливим параметром є коефіцієнт трансформації і резонансна частота. Ці дані необхідні для дослідження п'єзотрансформаторів.

### 1.3.2 Різновиди п'єзоелектричних матеріалів

П'єзокерамічні матеріали, як вказувалося раніш, являють собою п'єзоелектрики, одержувані шляхом синтезу з окислів металів. Відомі три основні системи п'єзокерамічних матеріалів, що знайшли практичне застосування: титанат барію і його похідні, ніобатні матеріали і матеріали цирконат-титанат свинцю (ЦТС).

Титанат барію ( $\text{BaTiO}_3$ ) застосовується для виготовлення п'єзоперетворювачів ряду приладів і пристроїв, заснованих на використанні п'єзо ефекта.

Титанат барію - перший п'єзоелектрик, отриманий у виді кераміки, але і дотепер широко використовується. Причини цього очевидні: його коефіцієнт електромеханічного зв'язку набагато перевищує значення, характерні для інших п'єзоелектриків, за винятком сегнетової солі. Титанат барію хімічно набагато більш стійкий, ніж сегнетова сіль, має більш широкий робочий інтервал температур і володіє тою очевидною перевагою, що його можна одержувати у виді кераміки.

Титанат барію  $\text{BaTiO}_3$  утворюється у двох основних структурах - перовскитовою, що є при деяких температурах сегнетоелектричною, і гексагональною, що не виявляє сегнетоелектричних властивостей. Вище  $1460^\circ\text{C}$  стійка гексагональна модифікація, причому вона може метастабільно зберігатися аж до кімнатної температури. При  $1460^\circ\text{C}$  звичайно спостерігається реконструктивний фазовий перехід у кубічну перовскитову модифікацію. Саме ця модифікація є основою для керамічного виробництва [17].

Титанат барію відноситься до титанатів металів другої групи періодичної системи елементів Менделєєва. Температура Кюрі титанату барію дорівнює  $120^\circ\text{C}$ . Вище цієї температури титанат барію має кубічну форму ґрат, тобто таку ж форму кристалічних ґрат, якою володіє мінерал перовскит  $\text{CaTiO}_3$ , представлений на рисунку 1.12, нижче  $120^\circ\text{C}$  - тетрагональну струк-

туру. При температурі близько  $10^{\circ}\text{C}$  відбувається другий перехід структури з тетрагональної в орторомбічну і при  $-70^{\circ}\text{C}$  - третій перехід у тригональні гра-ти. У точках фазових переходів у п'єзокераміки з титанату барію спостерігаються зміни п'єзоелектричних параметрів, але сегнетоелектричні властивості (спонтанна поляризація й інше) зберігаються у всій області нижче  $120^{\circ}\text{C}$ . Так, у п'єзокераміки з титанату барію при  $120^{\circ}\text{C}$  збільшуються діелектрична проникність і п'єзомодуль і знижуються резонансна частота, швидкість звуку і модуль Юнга [19].

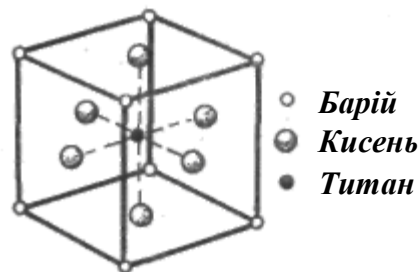


Рисунок 1.12 - Елементарний кристалічний осередок титанату барію.

П'єзокераміка титанату барію знаходить застосування в приладах і пристроях, використовуваних при температурах до  $60^{\circ}\text{C}$  і в тих випадках, коли до п'єзоелементів не пред'являються тверді вимоги по температурній стабільності частоти і чутливості.

Наявність низькотемпературних фазових переходів і низька точка Кюрі обмежують застосування титанату барію. Характеристики титанату барію удалося поліпшити й одержати тверді розчини титанату барію - кальцію  $(\text{BaCa})\text{TiO}_3$ , титанату барію - кальцію - свинцю  $(\text{BaCaPb})\text{TiO}_3$  і титанату барію - кальцію з малою добавкою кобальту. У цих складів фазові переходи зрушені в область більш низьких температур, однак точка Кюрі в них лише трохи вище (найбільш висока точка Кюрі в титанату барію - кальцію - свинцю  $140^{\circ}$  - усього на  $20^{\circ}\text{C}$  вище, ніж у чистого титанату барію), і тому вони також не задовольняють вимогам сучасної техніки.

Уведення кобальту у твердий розчин титанату барію - кальцію підвищив стійкість п'єзоелементів до впливу сильних електричних полів і великих механічних напруг. Хоча у цього складу є ряд недоліків, на визначений час удалося задовольнити потреби в керамічних п'єзоелектриках. Перераховані склади й утворили систему керамічних п'єзоелектриків, відому під найменуванням титанату барію і його похідних [20].

Другу систему керамічних п'єзоелектриків представляє ряд твердих розчинів, отриманих на основі метаніобата свинцю  $PbNb_2O_6$  і ніобата барію  $BaNb_2O_6$ . Склади ніобатної системи по ряду показників ефективніше складів системи титанату барію, однак широке поширення цих складів утруднене тим, що дотепер не вдалося визначити умов одержання однофазних складів, тим часом як основу твердих розчинів у цій системі складає ніобат свинцю ( $PbNb_2O_6$ ), що існує в двох модифікаціях - сегнетоелектричної і несегнетоелектричної.

У системі твердих розчинів  $(PbBa)Nb_2O_6$  температура Кюрі знижується до 220-270 °С при збільшенні змісту метаніобата барію до 40%, але при подальшому зростанні його концентрація підвищується. Спонтанна поляризація п'єзокерамічних зразків з таких твердих розчинів має високі значення [17].

Для п'єзокераміки на підставі метаніобата отримана відносно висока температурна стабільність діелектричної проникності в інтервалі температур від -50 до +60°C і таких параметрів, як п'єзомодуль  $d_{31}$ , резонансна й антирезонансна частоти, чутливість у режимі випромінювання при роботі на резонансних частотах в інтервалі температур від -50 до +150°C. Об'ємний опір зі збільшенням температури різко падає.

Наступна система п'єзоелектриків ЦТС - цирконата-титаната свинцю  $Pb((ZrTi)O_3)$  і його похідних. У широкому інтервалі концентрацій цирконат свинцю  $PbZrO_3$  і титанат свинцю  $PbTiO_3$  утворюють тверді розчини з високою температурою Кюрі, що досягають 300 °С і більш, а п'єзокерамічні елементи, виготовлені з таких матеріалів, мають високі діелектричні і п'єзоелектричні властивості та стійкість до зовнішніх впливів, включаючи сильні еле-

ктричні поля і великі механічні напруги. Отримано велику кількість твердих розчинів ЦТС, модифікованих стронцієм, ніобієм, хромом, кобальтом, барієм, натрієм, вісмутом, магнієм і малими добавками інших елементів [18].

Слід зазначити, що модифікацією матеріалів ЦТС удалося одержати склади з високою температурною стабільністю частоти, стійкістю до динамічних впливів, високою чутливістю, що використовуються в сучасному виробництві п'єзокерамічних матеріалів.

П'єзокерамічні матеріали системи ЦТС являють собою тверді розчини цирконата свинцю і титанату свинцю з малими добавками деяких трьох- і п'ятивалентних елементів і частковим заміщенням свинцю стронцієм.

Матеріали на основі твердих розчинів  $Pb(ZrTi)O_3$  системи ЦТС володіють високими п'єзоелектричними властивостями і високою точкою Кюрі. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку в п'єзокераміці ЦТС досягає 0,50 і більш.

Великий інтерес представляють п'єзокерамічні матеріали системи ЦТС, модифіковані хромом і кобальтом. Уведення до складу кераміки ЦТС невеликих добавок  $Cr_2O_3$  практично не змінює положення фазової границі.

У системі ЦТС мається ряд матеріалів, що володіють високою стабільністю в сильних електричних полях і при великих механічних напругах. Параметри цих матеріалів близькі до параметрів більшості матеріалів ЦТС, але в них швидкість звуку майже на 30% нижче, а значення діелектричних утрат вище.

Значний інтерес представляють залежності електричного заряду  $Q$  і діелектричної проникності  $\epsilon$  від механічних напруг  $\sigma$ , отримані на виготовлених з матеріалів системи ЦТС циліндрах діаметром 10 мм і висотою 10 мм. З даних отриманих дослідним шляхом видно, що кераміка ЦТС зберігає п'єзоелектричні властивості при однобічному напруженні в статичному режимі приблизно до 2800 кгс/см<sup>2</sup>.

Найбільш чуттєвим параметром п'єзокераміки є діелектрична проникність  $\epsilon$ . Навіть невеликі відхилення від стехіометричного складу позначають-

ся на її величині. Значення діелектричної проникності міняється навіть у тому випадку, коли відношення цирконію до титана у твердому розчині змінюється усього на десяті частки молярного відсотка.

Утворення твердих розчинів зі змістом  $ZrO_2$  та  $TiO_2$  з точністю, обумовленою десятими і сотими частками вагових відсотків, може бути здійснено, якщо строго регламентується склад сировини, застосовуваного для синтезу матеріалу, якщо вагове дозування компонентів виробляється з точністю до третього знака, технологія синтезу забезпечує повноту проходження реакції утворення твердого розчину заданого стехіометричного складу [19].

Характеристики п'єзокерамічних матеріалів і, зокрема, діелектрична проникність відчутно реагують на ці умови. У виробництві п'єзокерамічних матеріалів невиконання зазначених вимог приводить до великого розкиду значень діелектричної проникності.

Серед матеріалів, застосовуваних для виготовлення п'єзоелементів, що працюють у режимі прийому чи випромінювання в умовах впливу сильних електричних полів і механічних напруг, найменші необоротні зміни п'єзомодуля  $d_{31}$  мають матеріали системи ЦТС, найбільше - системи титанату барію. У деяких матеріалів системи титанату барію і ніобатної системи спостерігається ріст  $\text{tg } \delta$  після зволоження, що вказує на їхню підвищену пористість. У більшості матеріалів зміни властивостей при тривалому збереженні в нормальних умовах не перевищують допусків на розкид параметрів. Так, наприклад, у зразків з п'єзокераміки марки ЦТС за 5 років (без обліку погрешностей виміру) резонансна частота збільшилася на 0,8%, антирезонансна частота зменшилася на 0,4%, діелектрична проникність зменшилася на 1,8%, п'єзомодуль зменшився на 8% [21].

Таким чином, для вище перерахованих матеріалів можна записати основні їхні параметри й умови застосування.

Так, матеріали системи титанату барію використовуються при температурах не вище  $85\text{ }^\circ\text{C}$ , мінімальний п'єзомодуль  $d_{31} = 1,3 \cdot 10^{-6}$  см/статвольт, а для окремих марок матеріалів і нижче, температурний коефіцієнт частоти

кращих марок  $100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , швидкість звуку вище  $4,1 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ ; нижня межа середньої щільності  $5,2 \text{ г/м}^3$ .

Матеріали ніобатної системи можуть бути використані при температурах не вище  $150^\circ\text{C}$ , мінімальний п'єзомодуль  $d_{31} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ см/статвольт}$ , а для окремих марок  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ см/статвольт}$ , температурний коефіцієнт частоти кращих марок  $100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , швидкість звуку вище  $3,6 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ , нижня межа міцності при статичному стиску  $2000 \text{ кг/см}^2$ , нижня межа середньої щільності  $5,5 \text{ г/см}^3$ .

Матеріали системи ЦТС. можуть бути використані при температурах до  $300^\circ\text{C}$ , мінімальний п'єзомодуль  $d_{31}$  у більшості марок матеріалів складає  $3 \cdot 10^{-6} \text{ см/статвольт}$  і відповідно коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $k$  вище  $0,40$ , мінімальний температурний коефіцієнт частоти складає  $30 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , мінімальна швидкість звуку  $3,0 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ , середня щільність вище  $7,0 \text{ г/см}^3$ , мінімальні діелектричні втрати в сильних електричних полях.

Слід зазначити, що матеріали системи ЦТС одержали найбільш широке використання, що пояснюється як високими п'єзоелектричними параметрами цих матеріалів, так і можливістю змінювати їх у широких межах. В останнє десятиліття досить активно розроблялися нові п'єзоматеріали на основі ЦТС, що підтверджує унікальність системи ЦТС і її виняткове значення як основи нових матеріалів.

#### **1.4 Висновки за розділом**

Проведений аналіз показав, що коефіцієнт трансформації п'єзотрансформаторів має максимальне значення на резонансних частотах. Отже, можна зробити висновок, що для ефективності роботи п'єзотрансформаторів частота джерела живлення повинна бути близька до однієї з резонансних частот механічних коливань.

Вибір виду конструкції п'єзотрансформатора визначається в основному вимогами до його вхідних і вихідних електричних параметрів, а також до ін-



ших характеристик, таких як, стабільність параметрів, міцність, діапазон частот, температурна стабільність, вартість і т.д.

Поперечно-подовжня конструкція п'єзотрансформатора представляє особливий практичний інтерес. Коефіцієнт трансформації цієї конструкції може дорівнювати декільком тисячам.

Конструкція багат шарового п'єзотрансформатора дозволяє забезпечити високу щільність потужності п'єзотрансформатора, і відповідно зменшити габарити в 3-5 разів у порівнянні з традиційним одношаровим п'єзотрансформатором. Тому в плані дослідження такі конструкції п'єзотрансформатора становлять великий інтерес.

Можна зробити висновок, що умови застосування п'єзоперетворювача і вимоги, що пред'являються до параметрів п'єзоматеріала, визначають вибір п'єзоелектричного матеріалу.

При дослідженні п'єзотрансформатора необхідно знати параметри як п'єзотрансформатора, так і п'єзоелектричних матеріалів. Параметри п'єзоматеріалів використовуються при розрахунку еквівалентної схеми п'єзотрансформатора і, відповідно, при моделюванні.

Аналіз закордонної і вітчизняної літератури показує, що параметри і характеристики багат шарових п'єзотрансформаторів недостатньо освітлені, на відміну від одношарових. Таким чином, становить інтерес дослідження багат шарових п'єзотрансформаторів, а також порівняльний аналіз таких п'єзотрансформаторів з одношаровими.

## 2 ДРУГИЙ РОЗДІЛ

### ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ОДНОШАРОВИХ І БАГАТОШАРОВИХ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРІВ

#### 2.1 Методи дослідження п'єзотрансформаторів

На основі матеріалу розглянутого в першому розділі, можна зробити висновок, що методи дослідження п'єзотрансформаторів включають методи визначення характеристик і параметрів як самого п'єзотрансформаторів, так і п'єзоелектричних матеріалів.

Використання нових методів дослідження й установок виміру параметрів п'єзотрансформаторів дозволяє одержувати нові, більш широкі знання про п'єзотрансформатори.

Анізотропія фізико-математичних властивостей п'єзоелектриків і взаємозв'язок електромагнітного поля з механічними рухами істотно ускладнюють опис процесів, які мають місце у п'єзоелементі. У зв'язку з цим значна увага приділяється розвитку і створенню математичних методів кількісного аналізу.

Основні співвідношення лінійної теорії електропружності складаються з рівнянь, що описують механічну сторону п'єзоефекта і рівнянь Максвелла, що описують електричні явища в середовищі. Зв'язок між перемінними двох типів рівнянь визначається фізичними співвідношеннями - рівняннями п'єзоефекта.

Визначальна система рівнянь для п'єзоелектричного тіла складається з двадцяти двох диференціальних рівнянь. Тому точне рішення крайової задачі електропружності можливо лише для найпростіших випадків. У практично важливих задачах приходиться задовольнятися наближеними рішеннями [22].

Ефективним засобом побудови наближених рішень є варіаційні методи. Рішення задачі у варіаційному формулюванні полягає в перебуванні функцій, на яких функціонал відповідного варіаційного принципу має стаціонарне значення.

Істотне значення для розуміння процесів, що протікають у п'єзоелектричних тілах, мають рішення одномірних задач для тіл у вигляді стержнів, тонких дисків і пластин, кілець, нескінченних циліндрів. Коливання таких тіл описуються скалярними рівняннями, точні рішення яких будуються досить просто.

Альтернативний підхід до дослідження п'єзоперетворювачів складається в заміщенні п'єзоелектрика еквівалентною електричною схемою з наступним розрахунком по теорії електричних ланцюгів [23]. Такий підхід необхідний при рішенні питання про узгодження і загальний аналіз електричного ланцюга, частиною якого є схема заміщення п'єзоелектрика. На підставі еквівалентної схеми можливий аналіз роботи п'єзотрансформаторів шляхом моделювання.

Для аналізу перетворювачів широко застосовуються також методи теорії автоматичного керування [13].

Нарешті, найбільш точні результати, і досить простим шляхом, можуть бути отримані експериментальним шляхом.

З урахуванням вищесказаного методи дослідження п'єзотрансформаторів можуть бути розділені на такі напрямки:

- експериментальні методи визначення параметрів п'єзокераміки;
- методи визначення параметрів п'єзокераміки шляхом розрахунку;
- експериментальні методи одержання основних характеристик п'єзотрансформаторів;
- дослідження за допомогою еквівалентної схеми заміщення п'єзотрансформаторів;
- моделювання п'єзотрансформаторів використовуючи його еквівалентну схему.

### 2.1.1 Методи визначення параметрів п'єзоелектричних матеріалів і елементів

Як відзначалося в першому розділі, при проектуванні пристроїв на основі п'єзотрансформаторів необхідно знати параметри як п'єзотрансформаторів, так і п'єзоелектричних матеріалів.

Властивості п'єзокерамічного елемента характеризуються параметрами, значення яких можуть бути отримані іспитом чи виміром готового для використання елемента.

Параметри п'єзокерамічних матеріалів нормуються в [17], а методи їхнього визначення більш детально описані в [17,18].

Основними характеристиками п'єзокерамічних матеріалів є:

- коефіцієнт електромеханічного зв'язку ( $K_p$ );
- питомий об'ємний електричний опір ( $\rho_v$ );
- щільність ( $\rho$ );
- п'єзомодуль у статичному режимі ( $d_{33}$ );
- тангенс кута діелектричних втрат у слабких електричних полях ( $\text{tg } \delta$ );
- тангенс кута діелектричних втрат у сильних електричних полях ( $\text{tg } \delta$ );
- електрична міцність ( $E_{\text{пр}}$ );
- температура точки Кюрі ( $T_K$ );
- модуль Юнга ( $Y$ );
- відносна діелектрична проникність ( $\epsilon_{33}/\epsilon_0$ );
- швидкість звуку ( $V_3^D$ );
- п'єзомодуль ( $d_{31}$ ).

Методи виміру параметрів експериментальним шляхом наведені нижче.

### **Визначення коефіцієнта електромеханічного зв'язку ( $K_p$ )**

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $K_p$  обчислюють по формулі:

$$K_p = \sqrt{\frac{\eta^2 - \sigma^2}{2(1 + \sigma)}} \cdot \left(1 - \frac{f_r^2}{f_a^2}\right), \quad (2.1)$$

де  $\eta$  - найменший позитивний корінь частотного рівняння;

$\sigma$  - коефіцієнт Пуассона;

$f_r$  - резонансна частота, Гц;

$f_a$  - антирезонансна частота, Гц.

### **Визначення коефіцієнта Пуассона ( $\sigma$ )**

Коефіцієнт Пуассона  $\sigma$  у залежності від значення коефіцієнта  $\beta$  вибирають з таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Залежність коефіцієнта Пуассона  $\sigma$  від значення коефіцієнта  $\beta$

$\beta$	2,6746	2,6670	2,6559	2,6529	2,6448	2,6375	2,6304	2,623	2,6173
$\sigma$	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32
$\beta$	2,6097	2,6040	2,5963	2,5897	2,5832	2,5775	2,5705	2,5642	
$\sigma$	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	

Коефіцієнт  $\beta$  обчислюють по формулі

$$\beta = \frac{f_{01}}{f_r}, \quad (2.2)$$

де  $f_{01}$  - частота першого обертоу, Гц;

$f_r$  - резонансна частота, визначена амплітудним методом, Гц.

### **Визначення найменшого позитивного кореня частотного рівняння ( $\eta$ )**

Найменший позитивний корінь частотного рівняння  $\eta$  у залежності від значення коефіцієнта Пуассона  $\sigma$  вибирають з таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Залежності найменшого позитивного кореня від значення коефіцієнта Пуассона  $\sigma$

$\sigma$	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32
$\eta$	2,0112	2,0179	2,0238	2,0300	2,0362	2,0425	2,0488	2,0551	2,0612
$\sigma$	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41
$\eta$	2,0673	2,0735	2,0795	2,0855	2,0915	2,0974	2,1041	2,1109	2,1150
$\sigma$	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50
$\eta$	2,1208	2,1266	2,1323	2,1380	2,1436	2,1492	2,1548	2,1604	2,1659

### **Визначення питомого об'ємного електричного опору ( $\rho_v$ )**

Питомий об'ємний електричний опір  $\rho_v$  (Ом·см), зразка визначають, вимірюючи опір його ізоляції при постійній напрузі не більш 100 В. Відносна погрішність виміру повинна бути не більш  $\pm 20\%$ . Відлік опору проводять через одну хвилину з моменту подачі вимірювальної напруги.

Значення питомого об'ємного електричного опору  $\rho_v$  обчислюють по формулі:

$$\rho_v = R \cdot \frac{S_e}{b}, \quad (2.3)$$

де  $R$  - опір ізоляції, ГОм;

$S_e$  - площа поверхні електрода, см<sup>2</sup>;

$b$  - товщина зразка, см.

### ***Визначення щільності ( $\rho$ )***

Щільність  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>), визначають на механічно оброблених зразках. При цьому величина обробки з кожної сторони повинна бути не менш 1 мм. Перед зважуванням зразки повинні попередньо прожарюються при температурі  $873 \pm 20\text{K}$  ( $600 \pm 20^\circ\text{C}$ ), після цього їх ретельно протирають тканинним тампоном, змоченим у спирті. Погрішність зважування зразків повинна бути не більш 0,001 г.

Після зважування прожарених зразків проводиться насичення їх водою, зважування на повітрі і гідростатичне зважування за ГОСТ 2409-67.

Розкид значень щільності між двома одночасними зважуваннями повинний бути не більш 0,2 г/см<sup>3</sup>.

### ***Вимір п'єзомодуля в статичному режимі ( $d_{33}$ )***

П'єзомодуль  $d_{33}$  у статичному режимі визначають шляхом виміру значення заряду на електродах зразка в момент зняття навантаження, прикладеному по осі поляризації, на установці, структурна схема якої приведена на рисунку 2.1. Електроди повинні бути розташовані перпендикулярно напрямку навантаження.

П'єзомодуль  $d_{33}$  обчислюють по формулі

$$d_{33} = \frac{Q}{F} = K \cdot a, \quad (2.4)$$

де  $Q$  - заряд, що виникає на електродах, Кл;

$F$  - сила, прикладена до зразка, Н;

$K$  - поправочний коефіцієнт, що залежить від  $F$ ;

$a$  - відхилення світлового покажчика дзеркального балістичного гальванометра при вимірі, мм.

Заряд, що виникає на зразку під дією сили, вимірюють за допомогою гальванометра. Сила прикладається до зразка за допомогою спеціального пристосування, що дає можливість різко знімати прикладену механічну напругу.

Ємність проводів, що з'єднують зразок з установкою, повинна бути не більш 10 пФ, а від установки до гальванометра - не більш 110 пФ. Відносна погрішність визначення п'єзомодуля  $d_{33}$  повинна бути не більш  $\pm 10\%$ .

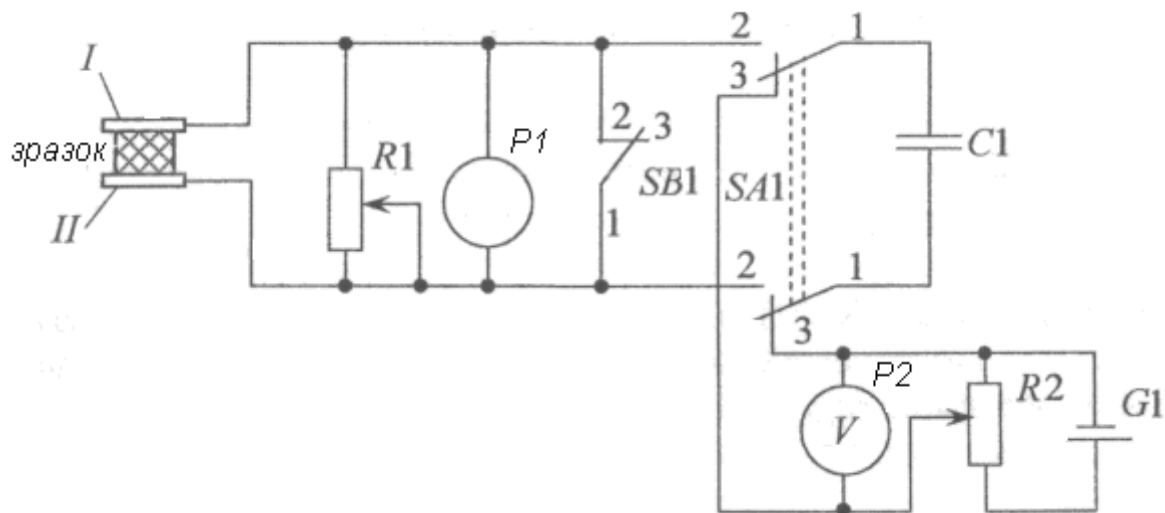


Рисунок 2.1. Установа для виміру  $d_{33}$

На рисунку 2.1 прийняті такі позначення: 1,2,3 - положення перемикача і кнопки;  $I$  - рухомий електрод, до якого прикладається навантаження;  $II$  - нерухомий електрод;  $R1$  - шунтуючий опір, який служить для регулювання чутливості гальванометра;  $P1$  - гальванометр балістичний дзеркальний;  $SB1$  - кнопка, що замикає ланцюг гальванометра;  $SA1$  - здвоєний перемикач на два положення;  $C1$  - стандартний конденсатор (підбирається експериментально, зразкова електрична ємність якого 1000-5000 пФ);  $P2$  - вольтметр постійного струму, клас 0,5, межі вимірів до 30 В;  $R2$  - потенціометр, за допомогою якого встановлюється необхідна напруга на стандартному конденсаторі;  $G1$  - джерело постійного струму напругою до 30 В.



### ***Визначення тангенса кута діелектричних втрат у слабких електричних полях ( $\text{tg } \delta$ )***

Тангенс кута діелектричних утрат  $\text{tg } \delta$  у слабких електричних полях визначають при напрузі не більш 5 В і частоті  $1000 \pm 200$  Гц універсальним мостом чи іншим приладом з погрішністю виміру не більш  $\pm 0,1 \text{ tg } \delta$  на установці, структурна схема якої приведена на рисунку 2.2.

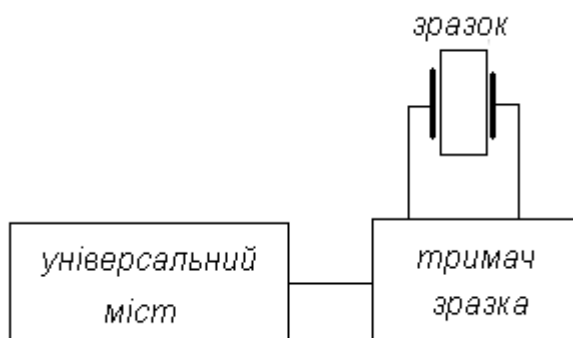


Рисунок 2.2 - Структурна схема установки для виміру  $\text{tg } \delta$

Тангенс кута діелектричних утрат  $\text{tg } \delta$  після зволоження визначають на неполяризованих зразках тим же методом.

Попередньо зразки повинні бути витримані протягом 24 ч у дистильованій воді при температурі  $298 \pm 10$  К ( $25 \pm 10^\circ\text{C}$ ). Після витримки зразки повинні бути протерті марлею за ГОСТ 11109-74 і висушені протягом 2 годин при температурі  $298 \pm 10$  К ( $25 \pm 10^\circ\text{C}$ ), відносної вологості повітря  $65 \pm 15\%$  і атмосферному тиску  $1 \cdot 10^5 \pm 4 \cdot 10^3$  Па.

### ***Визначення тангенса кута діелектричних втрат у сильних електричних полях ( $\text{tg } \delta$ )***

Тангенс кута діелектричних утрат  $\text{tg } \delta < 5$  у сильних електричних полях визначають на поляризованих зразках у виді дисків у спеціальній установці з

погрішністю вимірів не більш  $\pm 0,15 \operatorname{tg} \delta$  при амплітудній напрузі  $U_m > 3$  кВ, що забезпечує частоту 50 Гц.

Значення амплітудної напруги  $U_m$ , В, обчислюють по формулі

$$U_m = E_m \cdot b, \quad (2.5)$$

де  $E_m$  - амплітудне значення напруженості електричного поля, В/см;

$b$  - товщина зразка, см.

Значення напруженості поля  $E_m$  на кожен марку матеріалу вказується в стандартах і технічних умовах на конкретні марки п'єзокерамічних матеріалів.

### ***Вимір електричної міцності ( $E_{\text{пр}}$ )***

Електричну міцність  $E_{\text{пр}}$  (В/м; кВ/мм), визначають на іспитовій установці, що забезпечує плавний підйом напруги зі швидкістю не більш 500 В/с. Вимірюють напругу приладом, погрішність якого не більш 2,5%. Діаметр електродів, що затискають зразок і підводять до нього напругу від іспитової установки, не повинні перевищувати 6 мм.

Іспит зразка проводять у конденсаторній олії за ГОСТ 5775-68.

Електричну міцність зразка  $E_{\text{пр}}$  обчислюють по формулі

$$E_{\text{пр}} = \frac{U}{b}, \quad (2.6)$$

де  $U$  - пробивна напруга, кВ;

$b$  - товщина зразка в місці пробою, мм, яка обмірюється з погрішністю не більш  $\pm 0,1$  мм.

### ***Визначення температури точки Кюрі ( $T_K$ )***

Температурою точки Кюрі ( $T_K$ ) п'єзокерамічного матеріалу є температура, при якій спостерігається максимум величини діелектричної проникності цього матеріалу, обчислена за обмірюваним значенням статичної ємності зразка.

Температуру точки Кюрі зразків визначають у термокамері. За дійсне значення температури точки Кюрі приймають середнє значення температури точки Кюрі, отримане при вимірі 10 зразків [24].

### ***Параметри, що визначається розрахунковим шляхом***

#### ***Модуль Юнга ( $Y_{31}^{Ю}$ )***

Модуль Юнга визначається на зразках у виді довгих тонких стержнів чи тонких пластинок з великою площею головних площин.

Модуль Юнга пластини обчислюється по формулі

$$Y_{31}^{Ю} = 4 \rho \cdot t^2 \cdot f_r^2 \text{ [дн/см}^2\text{]} \quad (2.7)$$

де  $t$  - товщина зразка, см;

$f_r$  - резонансна частота зразка, Гц.

Модуль Юнга стержня обчислюється по формулі

$$Y_{31}^{Ю} = 4 \rho \cdot l^2 \cdot f_r^2 \text{ [дн/см}^2\text{]} \quad (2.8)$$

де  $l$  - довжина зразка;

$f_r$  - резонансна частота подовжніх коливань зразка.

Модуль Юнга  $Y_{31}^{Ю}$  для диска, у динамічному режимі визначають по формулі

$$Y_{31}^{ro} = \frac{0.4\pi^2}{\eta^2} \cdot fr^2 \cdot \frac{D^2}{4} \rho \cdot (1 - \sigma^2), \quad (2.9)$$

де  $f_r$  - резонансна частота радіальних коливань, Гц;

$D$  - діаметр диска, см;

$\rho$  - щільність, г/см<sup>3</sup>;

$\sigma$  - коефіцієнт Пуассона;

$\eta$  - найменший позитивний корінь частотного рівняння, обраний з таблиці в залежності від значення  $\sigma$  [4,17].

### **Відносна діелектрична проникність ( $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$ )**

Відносну діелектричну проникність матеріалу обчислюють по формулі

$$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = \frac{11,3 \cdot C_0 \cdot b}{S_e}, \quad (2.10)$$

де  $C_0$  - статична електрична ємність зразка, пФ;

$b$  - товщина зразка, см;

$S_e$  - площа поверхні електрода, см<sup>2</sup>.

У розрахункову формулу повинні бути підставлені фактичні значення лінійних розмірів для кожного зразка.

### **Швидкість звуку ( $V_3^D$ )**

Швидкість звуку ( $V_3^D$ ) обчислюють по формулам, які приведені нижче.

Для зразка у формі бруска

$$V_3^D = 2 \cdot 10^{-2} f_a \cdot l, \quad (2.11)$$

де  $f_a$  - антрирезонансна частота подовжніх коливань, Гц;

$l$  - довжина зразка, м.

Для зразка у формі диска

$$V_3^D = \frac{f_r \pi D}{\eta} \cdot \sqrt{1 - \sigma^2}, \quad (2.12)$$

де  $f_r$  - резонансна частота радіальних коливань, Гц;

$D$  - діаметр зразка, м;

$\sigma$  - коефіцієнт Пуассона;

$\eta$  - найменший позитивний корінь частотного рівняння, обраний з таблиці в залежності від значення  $\sigma$ .

### **П'єзомодуль ( $d_{31}$ )**

П'єзомодуль  $d_{31}$  визначається розрахунковим шляхом за значеннями резонансної й антирезонансної частот, діелектричної проникності п'єзоелемента і щільності кераміки, з якої зроблений п'єзоелемент.

У п'єзомодуля  $d_{31}$  перший індекс відноситься до електричного поля, спрямованому паралельно товщині диска. Другий індекс відноситься до деформації, перпендикулярної напрямку поляризації, тобто спрямованої по радіусі диска. П'єзомодуль елементів у формі диска при  $K_p \leq 0,5$  визначається по формулі

$$d_{31} = \sqrt{8,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{r^2 \rho} \cdot \frac{\Delta f}{f_r^3} \cdot \varepsilon}, \quad (2.13)$$

де  $d_{31}$  - п'єзомодуль, см/статвольт;

$r$  - радіус диска, см;

$\rho$  - щільність матеріалу, г/см<sup>3</sup>;

$f_r$  - резонансна частота, Гц;

$\Delta f = f_a - f_r$  - резонансний проміжок, Гц

$f_a$  - антирезонансна частота, Гц.

Для зразків у формі стержня розрахунок здійснюється по формулі

$$d_{31} = \sqrt{\frac{\pi}{64\rho l^2} \cdot \frac{\Delta f}{f_r^3} \cdot \varepsilon}, \quad (2.14)$$

де  $l$  - довжина стержня [24].

Таким чином, можна зробити висновок, що з усіх відомих методів визначення параметрів п'єзоматеріалів і п'єзоелементів найбільш точним і досить простим є спосіб одержання даних експериментальним шляхом.

Вище перераховані показники, якими можуть бути охарактеризовані властивості п'єзокерамічних заготовок, що використовуються для виробництва п'єзокерамічних елементів, досить важливі. Тому що знання цих параметрів визначає такі характеристики п'єзоелемента, як стабільність параметрів, міцність, діапазон частот, температурна стабільність і т.д.

### 2.1.2 Методи визначення характеристик п'єзотрансформаторів

Як відзначалося в першому розділі, важливим параметром п'єзотрансформаторів є резонансна частота. Тому що коефіцієнт трансформації має максимальне значення на резонансних частотах, отже, для ефективності роботи п'єзотрансформаторів частота джерела живлення повинна бути близька до однієї з резонансних частот механічних коливань. Для розробки схем на базі п'єзотрансформаторів розробник повинний знати значення резонансної частоти. Звичайно такі дані приводить завод-виготовлювач, однак ці значення часто приблизні. Як правило, вказується лише межа в який лежить значення резонансної частоти.

Нижче описаний фазовий метод виміру резонансної й антирезонансної частоти.

Структурна схема установки, яка використовується для виміру даних параметрів, приведена на рисунку 2.3

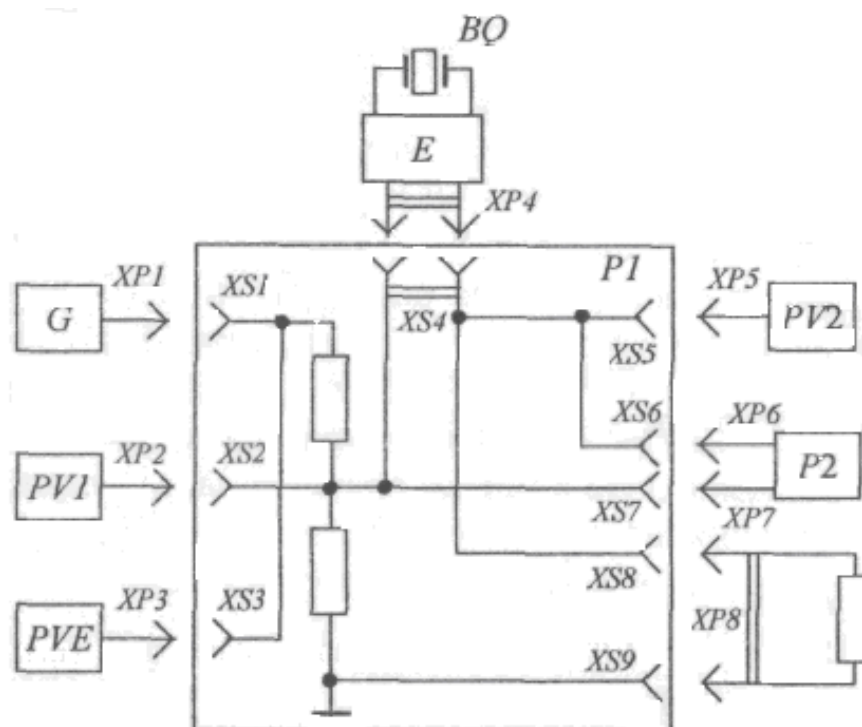


Рисунок 2.3 - Установка для виміру резонансної й антирезонансної частоти

На рисунку 2.3 прийняті такі позначення:  $G$  - генератор сигналів;  $PV1$ ,  $PV2$  - мілівольтметри;  $PVE$  - електронний частотомір;  $XP1$ - $XP8$ ;  $XS1$ - $XS9$  – роз'єми;  $BQ$  - зразок;  $E$  – тримач зразка;  $P1$  - пасивний чотириполюсник; сполучні кабелі марки РК-75-4-11, РК-75-4-16 довжиною не більш 0,5м

Для вимірювання резонансної частоти  $f_r$  встановлюють у гнізда  $XS4$  тримач  $E$  зі зразком  $BQ$ . З генератора  $G$  на вхід чотириполюсника  $P1$  (роз'єм  $XS2$ ) подають сигнал такого значення, щоб на вході зразка (роз'єм  $XS2$ ) напруга складала  $200 \pm 20$  мВ. Напругу контролюють за допомогою мілівольтметра  $PV1$ . До роз'єму  $XP8$  підключають навантажувальний резистор. Плавно змінюючи частоту генератора  $G$ , домагаються максимального відхилення стрілки мілівольтметра  $PV2$ , при цьому напруга на виході зразка повинна бути в межах 10-15 мВ.

Якщо напруга на мілівольтметрі  $PV2$  відмінна від зазначеного вище, необхідно підібрати значення опору навантажувального резистора. Потім, змінюючи частоту генератора  $G$ , домагаються нуля фази по показанню фазометра  $P2$ . Якщо значення сигналу для фазометра недостатньо, то допускається використовувати підсилювач з мінімальним фазовим зсувом у діапазоні частот зразків і подальшим його обліком. При цьому необхідно заново відкалібрувати фазометр  $P2$ . Нулю фази відповідає резонансна частота  $f_r$ , яку вимірюють частотоміром  $PVE$ .

Для виміру резонансної частоти  $f_r$ , однотипних зразків підстроювання фазометра допускається не робити.

Для виміру антирезонансної частоти  $f_a$  до роз'єму  $XP8$  підключають навантажувальний резистор. Плавно змінюючи частоту генератора  $G$ , домагаються мінімального відхилення стрілки мілівольтметра  $PV2$ , при цьому напруга повинна бути в межах 1-3 мВ.

Якщо напруга на мілівольтметрі  $PV2$  відмінна від зазначеного вище, необхідно підібрати значення опору навантажувального резистора  $R3$ . Потім, змінюючи частоту генератора  $G$ , домагаються нуля фази по показанню фазометра  $P2$ .

Якщо значення сигналу для фазометра недостатньо, то допускається використовувати підсилювач з обліком його фазового зсуву. При цьому необхідно заново відкалібрувати фазометр  $P2$ .

Нулю фази фазометра  $P2$  відповідає антирезонансна частота зразка, що виміряється частотоміром  $PVE$ . При вимірі антирезонансної частоти варто використовувати тримач з мінімальною електричною ємністю.

Далі описаний амплітудний метод виміру резонансної  $f_r$  і антирезонансної  $f_a$  частот.

Вимір проводять за схемою представленої на рисунку 2.3 без використання фазометра. Значенню частоти  $f_r$  відповідає максимальне відхилення



мілівольтметра *PV2*, а мінімальне відхилення мілівольтметра *PV2* відповідає частоті  $f_a$ . Значення частоти виміряється частотоміром *PVE*.

Для виміру частоти першого обертона  $f_{01}$  радіальних і подовжніх коливань проводять на раніше зазначеній установці (рисунок 2.3) без застосування фазометра в наступному порядку. До роз'єму *XP8* підключають навантажувальний резистор. Плавно змінюючи частоту генератора *G* убік збільшення від  $f_r$ , домагаються максимального відхилення стрілки на мілівольтметрі *PV2*. При цьому напруга повинна бути в межах 5-15 мВ.

Якщо напруга на мілівольтметрі *PV2* відмінна від зазначеного вище, необхідно підібрати значення опору навантажувального резистора. Максимальне відхилення стрілки мілівольтметра *PV2* відповідає частоті першого обертона  $f_{01}$  і виміряється частотоміром *PVE*.

Частота першого обертона вище частоти резонансної приблизно в 2,6 рази [24].

### ***Визначення моночастотності***

Одна з установок для визначення моночастотності п'єзоелементів і п'єзокерамічних перетворювачів приведена на рисунку 2.4.

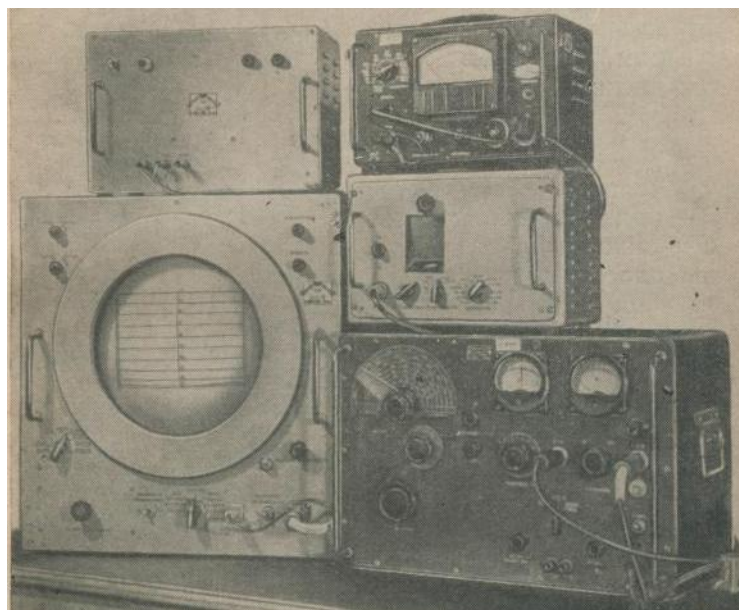


Рисунок 2.4 – Установка для визначення моночастотності

Установка складається з моста для виміру ємності з прямим відліком ємності, джерела перемінної напруги на фіксованих частотах і електронолуцевого показчика. Виміри роблять на частоті 1000 Гц при напрузі на виході генератора 15 В. На відповідних шкалах виробляється відлік ємності в пФ. У цьому випадку погрішність виміру складає для  $C_0 \pm 2\%$ . Для виміру ємностей п'єзоелементів користуються стандартними приладами (рисунок 2.5)



а)



б)



в)

Рисунок 2.5 - Пристрої для виміру ємності

а) – прилад типу E7-8; б) - прилад типу E7-14; в) = прилад типу E7-20.

Механічна добротність  $Q_M$  знаходиться розрахунковим шляхом за формулою

$$Q_M = \frac{f_a^2 \cdot 10^{12}}{2\pi \cdot Rr \cdot C_0 \cdot f_r \cdot (f_a^2 - f_r^2)}, \quad (2.15)$$

де  $R_r$  - опір п'єзоелемента на резонансній частоті

$$R_r = R_H \cdot \left( \frac{U_{ВХ}}{U_{ВИХ}} - 1 \right), \quad (2.16)$$

де  $R_H$  - опір навантаження, включений у структурну схему на рисунку 2.3 при вимірі  $f_r$ , Ом;

$U_{ВХ}$  - напруга на вході пристрою, вимірювана мілівольтметром  $PV1$ , В;

$U_{ВИХ}$  - напруга на виході пристрою на резонансній частоті, вимірювана мілівольтметром  $PV2$ , В;

$C_0$  - статична електрична ємність зразка, обмірювана на частоті 1000 Гц, пФ [17].

Технічний прогрес не стоїть на місці. Разом з ним збільшуються можливості і зменшуються розміри вимірювальної техніки.

Одна з установок для виміру основних параметрів п'єзоелементів представлена на рисунку 2.6. Дана установка розроблена науковим конструкторсько-технологічним (НКТБ) бюро "П'єзоприбор" Ростовського державного університету.

Крім виміру основних параметрів передбачено також:

- визначення полярності п'єзоелементів;
- реєстрація зміни п'єзомодуля в діапазоні високих температур на самописці.

Параметри для різних установок для виміру параметрів п'єзоелементів розроблених науковим конструкторсько-технологічним бюро "П'єзоприбор" наведені в таблиці 2.3.



Рисунок 2.6 - Установа для виміру параметрів п'єзоелементів

Таблиця 2.3 - Параметри різних установок

Параметри	Установки						
	ДОН-4	РУБИН	АЛМАЗ	АТОЛЛ	ЗВОННИЦА	ГВОЗДИКА	П'ЄЗОМОДУЛЬ
Діапазон статичного навантаження, кг·с	30-300	20-3000	5-3000	8	12	10±0,5	8±0,5
Амплітуда змінної механічної сили, кгс	1-10	1	10,5-60	1	1	1	1
Діапазон температурних впливів, °С	-196+700	196+700	196+800	+25+700	+25+700	-196+700	кімнатна температура
Погрішність виміру чутливості, %*		±5		±6	±6	±5	±5
Діапазон виміру п'єзочутливості на заданому ємнісному навантаженні, мВ/Н						0,2-100	0,2-200
Діапазон змінюваних значень п'єзомодулю, пК/Н					(3;10;30;100;300;1000)10 <sup>-6</sup>		
Діапазон виміру ємності, пФ						30-10000	

\* Величини погрешностей приведені за результатами відомчої атестації.

Більш компактним і сучасним є автомат для виміру параметрів п'єзо-елементів "П'єзо-1", який розроблений науковим конструкторсько-технологічним бюро "П'єзоприбор".



Рисунок 2.7 - Установка для виміру параметрів п'єзоелементів "П'єзо"

Автомат призначений для використання в якості універсального робочого вимірювального засобу при вимірі параметрів і паспортизації п'єзо-кераміки, п'єзоелементів, перетворювачів і інших пристроїв п'єзотехніки.

Виміри параметрів проводяться з електричної сторони при збудженні зразка змінною електричною напругою в області резонансу.

Автомат випускається в двох виконаннях:

- автомат складається з вимірювального блоку, який може бути з'єднаним з будь-якими типами персональних ЕОМ типу IBM. У комплект постачання входять, крім вимірювального блоку, плата стикування з ЕОМ і розвите програмне забезпечення з повним комплектом експлуатаційної документації;

- автомат складається з вимірювального блоку, генератора ГЗ-110, вимірювального моста типу Е7-8, керованих від ЕОМ.

Прилад може бути використаний як універсальний засіб у процесі наукових досліджень, а також при серійному випуску і відбракуванні великих партій виробів п'єзотехніки для гідроакустики, датчикових систем і т.д.

Основна перевага автомата - висока продуктивність визначення широкого спектра параметрів контрольованих виробів при забезпеченні всіх мет-

рологічних вимог діючих стандартів і автоматичної паспортизації вимірюваних пристроїв.

Усього визначається до 10-12 параметрів, що цілком характеризують роботу пристроїв п'єзотехніки.

Також цим НТКБ був розроблений автоматизований комплекс для виміру параметрів п'єзокерамічних матеріалів, п'єзоелементів, перетворювачів і пристроїв п'єзотехніки типу "Лиман".

Автоматизований комплекс "Лиман" проводить вимір повного спектра електрофізичних параметрів контрольованих пристроїв п'єзотехніки шляхом виміру динамічним методом у діапазоні 0,1 - 2000 кГц. Використовується в якості робочого вимірювального засобу при контролі і вимірі параметрів п'єзокераміки, паспортизації п'єзоелементів, перетворювачів і інших пристроїв п'єзотехніки.

Аналіз сучасних методів виміру показав, що тепер існує безліч способів і приладів що дозволяють визначити всі необхідні параметри п'єзоелементів, використовуючи сучасну базу вимірювальної техніки.

Вибір п'єзотрансформатора для конкретного пристрою, визначається його основними характеристиками, до яких відносяться амплітудно-частотні, фазо-частотні характеристики й інші залежності.

Для п'єзотрансформаторів особливо важливою характеристикою є амплітудно-частотна характеристика - залежність амплітуди синусоїдальних коливань від їхньої частоти на виході пристрою при постійній амплітуді на вході. В електротехніці, радіотехніці, електроніці по амплітудно-частотній характеристиці визначають такі параметри, як смуга пропускання частот, вибірковість, добротність, по яких судять про роботу пристроїв (приладів).

Також становить інтерес вивчення залежності вихідної напруги п'єзотрансформаторів від вхідної. Ця залежність має лінійний характер, однак, починаючи з деяких значень вхідної напруги, вихідна напруга входить у

насичення, а при подальшому збільшенні вхідного зменшується. Це повинно враховуватися при побудові схем на базі п'єзотрансформаторів.

Коефіцієнт трансформації п'єзотрансформаторів залежить не тільки від частоти, але і від опорів навантаження і джерела [1]. Отже, залежність коефіцієнта трансформації від опору навантаження також важлива і повинна враховуватися при розробці пристроїв із застосуванням п'єзотрансформаторів.

Принципова схема дослідження перерахованих вище характеристик п'єзотрансформаторів і вимірювальний модуль представлені нижче.

Таким чином, узагальнюючи вищесказане, можна зробити висновок що розвиток методів і засобів, що забезпечать швидкодію і надійність визначення необхідних параметрів п'єзоелементів необхідно для подальшого удосконалювання і розширення області їхнього застосування.

### **2.1.3 Еквівалентна схема п'єзотрансформатора**

Одним з методів дослідження п'єзотрансформаторів є аналіз роботи п'єзотрансформаторів за допомогою еквівалентних схем. Еквівалентна схема п'єзоелектричного трансформатора виходить з еквівалентних схем двох п'єзоелектричних резонаторів, один із яких є збудником, інший - генератором.

Збудник і генератор можна розглядати як відрізки акустичного хвилеводу. Тому відповідно до аналогії електричних і механічних явищ можна припустити, що еквівалентними схемами таких хвилеводів є відрізки електричної лінії передачі, каскадно з'єднаних один з одним.

У зв'язку з цим пошук еквівалентної схеми п'єзотрансформатора починається з побудови еквівалентних схем збудника і генератора.

Розглянемо випадок, коли збудник (чи генератор) виконаний у виді тонкого п'єзокерамічного бруска, який представлений на рисунку 2.8, з коливанням розтягання - стиску по довжині.

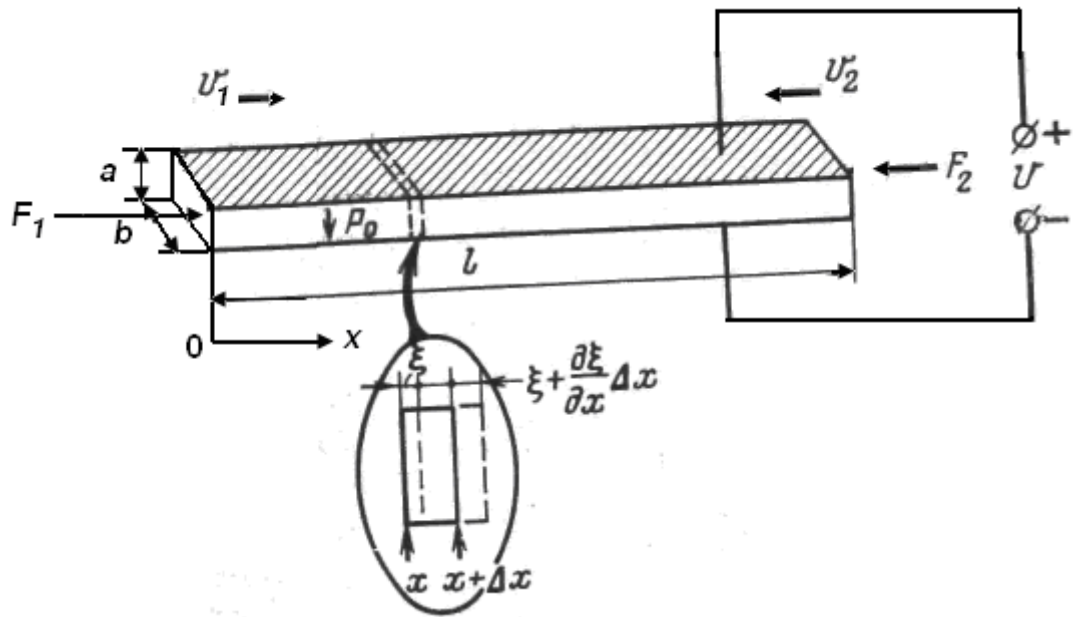


Рисунок 2.8 - Тонкий брусок з поперечною поляризацією

Знайдемо еквівалентну схему такого бруска. Для цього запишемо в матричній формі рівняння, які з'єднують для елементарного обсягу механічну напругу  $T$  і деформацію  $S$  з напруженістю електричного поля  $E$  і електричним зсувом  $D$ :

$$\begin{aligned} \|T\| &= \|c^D\| \|S\| - \|h_t\| \|D\|, \\ \|E\| &= -\|h\| \|S\| + \|\beta^S\| \|D\|, \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \|S\| &= \|s^E\| \|T\| + \|d_t\| \|E\|, \\ \|D\| &= \|d\| \|T\| + \|\varepsilon^T\| \|E\|, \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \|S\| &= \|s^D\| \|T\| - \|g_t\| \|D\|, \\ \|E\| &= -\|g\| \|T\| + \|\beta^T\| \|D\|, \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \|T\| &= \|c^E\| \|S\| - \|e_t\| \|E\|, \\ \|D\| &= \|e\| \|S\| + \|\varepsilon^S\| \|E\|, \end{aligned} \quad (2.20)$$



Тут  $c^E, c^D, s^E, s^D$  - постійні пружності;  $\varepsilon^T, \varepsilon^S, \beta^T, \beta^S$  - діелектричні постійні і  $h, g, d, e$  - п'єзоелектричні постійні в загальноприйнятих позначеннях; індекс  $t$  позначає транспоновану матрицю.

Звичайно п'єзоелектричні трансформатори виготовляються з п'єзокераміки, матриці постійних якої мають вид:

$$\|c^D\| = \begin{vmatrix} c_{11}^D & c_{12}^D & c_{13}^D & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^D & c_{11}^D & c_{13}^D & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^D & c_{13}^D & c_{33}^D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{14}^D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^D \end{vmatrix}$$

$$\|h\| = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & h_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{15} & 0 & 0 \\ h_{31} & h_{31} & h_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\|\beta^S\| = \begin{vmatrix} \beta_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{33}^S \end{vmatrix}$$

де  $c_{66}^D = 2(c_{11}^D - c_{12}^D)$ .

Виходячи з розрахунків, приведених у літературі [1] сили, що діють на кінці бруска, рівні:

$$F_1 = \left( \frac{z_0}{\text{th } \gamma l} + n_\varphi^2 Z_{\text{э.пр}} \right) v_1 + \left( \frac{z_0}{\text{sh } \gamma l} + n_\varphi^2 Z_{\text{э.пр}} \right) v_2 + n_\varphi Z_{\text{э.пр}} I$$

$$F_2 = \left( \frac{z_0}{\text{sh } \gamma l} + n_\varphi^2 Z_{\text{э.пр}} \right) v_1 + \left( \frac{z_0}{\text{th } \gamma l} + n_\varphi^2 Z_{\text{э.пр}} \right) v_2 + n_\varphi Z_{\text{э.пр}} I$$

$$U = n_\varphi Z_{\text{э.пр}} v_1 + n_\varphi Z_{\text{э.пр}} v_2 + Z_{\text{э.пр}} I,$$

$$\text{де } n_{\varphi} = bY_1^E d_{31}$$

$$Z_{\text{э.пр}} = \frac{U}{I} \Big|_{\sigma_2 = \sigma_1 = 0} = \frac{1}{j\omega \frac{bl}{a} e_{33}^T (1 - k_{31}^2)}$$

$$z_0 = ab\rho c = ab\sqrt{\rho Y_1^E}$$

$$\gamma = \frac{j\omega}{\sqrt{Y_1^E/\rho}} = \frac{j\omega}{c} = j\beta$$

$$c = \sqrt{Y_1^E/\rho}$$

Відповідно до теорії подоби дві системи подібні, якщо стан їх описується однаковим рівняннями. Таким чином, замінивши сили і коливальні швидкості електричною напругою і струмом одержимо рівняння багатоплюсника, схема якого є еквівалентною схемою п'єзоелектричного бруска. Ця схема показана на рисунку 2.9.

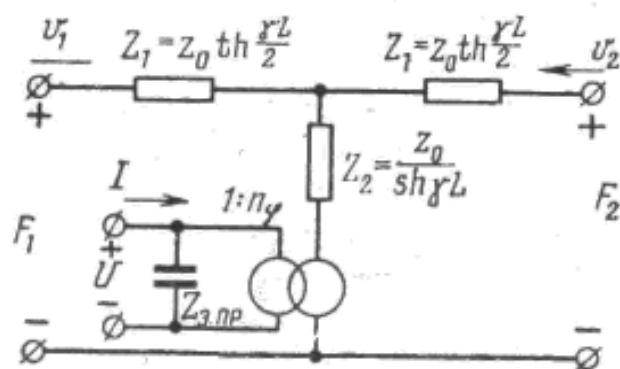


Рисунок 2.9 - Еквівалентна схема бруска з поперечною поляризацією

Подовжні по довжині хвилі в бруську можна збудити й у випадку, якщо він поляризований по довжині, як показано на рисунку 2.10,а.

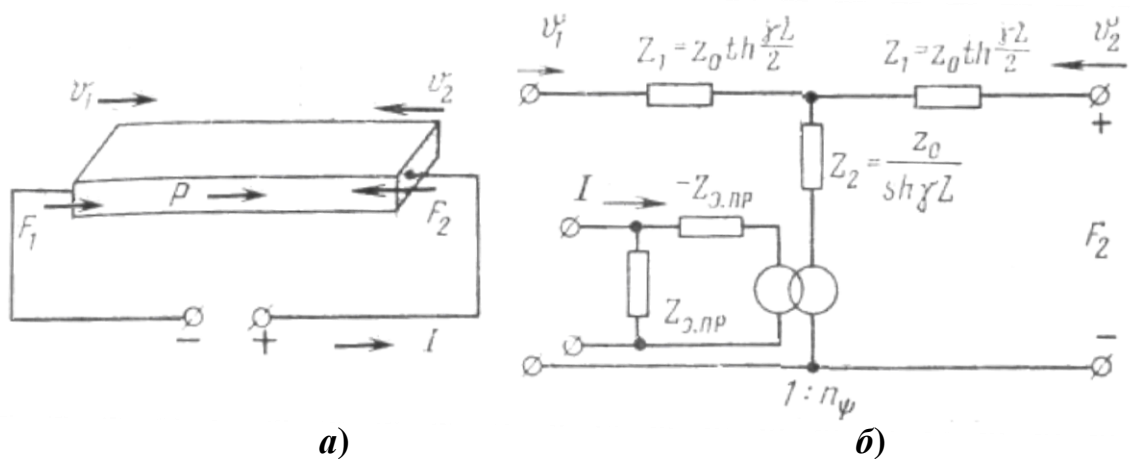


Рисунок 2.10 – Еквівалентна схема бруска подовжньої поляризації

Виконуючи викладення в тій же послідовності, одержуємо еквівалентну схему бруска з подовжньою поляризацією, показану на рисунку 2.10,б. параметри схеми визначаються формулами

$$z_0 = A \sqrt{\rho Y_3^D}; \quad (2.21)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\rho / Y_3^D}; \quad (2.22)$$

$$n_\psi = \frac{A}{l} Y_3^E d_{33}; \quad (2.23)$$

$$Z_{з.пр} = \frac{l}{j\omega A \epsilon_{33}^T (1 - Y_3^E g_{33}^T \epsilon_{33}^T)} \quad (2.24)$$

Візьмемо п'єзоелектричний брусок, наприклад, з електродами на торцях. Приклеїмо до торця другий такий же брусок, і ми одержимо трансформаторний п'єзоелемент - основну частину п'єзоелектричного трансформатора зі збудженням подовжніх по довжині хвиль. Даний п'єзоелектричний трансформатор представлений на рисунку 2.11. Резонанс цих хвиль має місце для випадку, коли довжина бруска кратна половині довжини хвилі  $\lambda$

$$L' + L'' = \frac{1}{2} \cdot n\lambda, \quad (2.25)$$

де  $n$  - ціле число (1, 2, 3,...), що визначає номер резонансу чи номер моди коливань.

Побудуємо еквівалентну схему розглянутого п'єзоелементу. Для цього побудуємо окремо схеми кожного бруска і каскадно з'єднаємо їх. Так як торці п'єзоелемента вільні, те це відповідає короткому замиканню по затискачах  $a - a$  і  $b - b$ . Дана еквівалентна схема представлена на рисунку 2.11. Перетворив трикутник у зірку, одержимо схему, показану на рисунку 2.12,а.

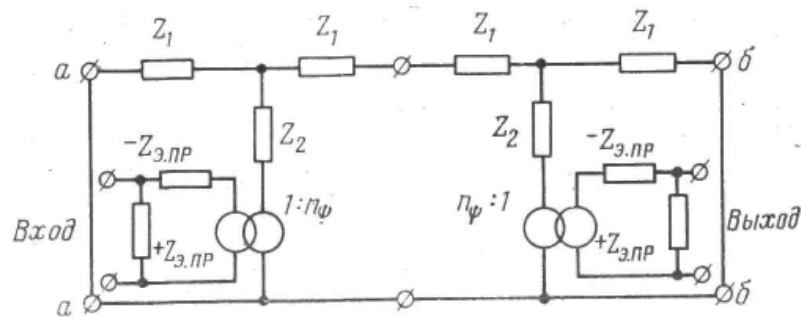


Рисунок 2.11 - З'єднання еквівалентних схем збудника і генератора.

Незалежно від того, з якої сторони підключений п'єзоелектричний трансформатор до джерела, після першого трансформатора енергія існує тільки в механічній формі. Тому частина схеми між трансформаторами названа механічною, а інші дві частини названі відповідно вхідною електричною частиною і вихідною електричною частиною.

У загальному випадку параметри вхідної і вихідної частини не однакові, тому надалі параметри вхідної і вихідної частини будемо позначати відповідно одним і двома штрихами.

Схему заміщення, яка показана на рисунку 2.12,а, можна розглядати як узагальнену схему п'єзоелектричного трансформатора, оскільки вона є загальною для усіх відомих конструкцій п'єзоелектричних трансформаторів.

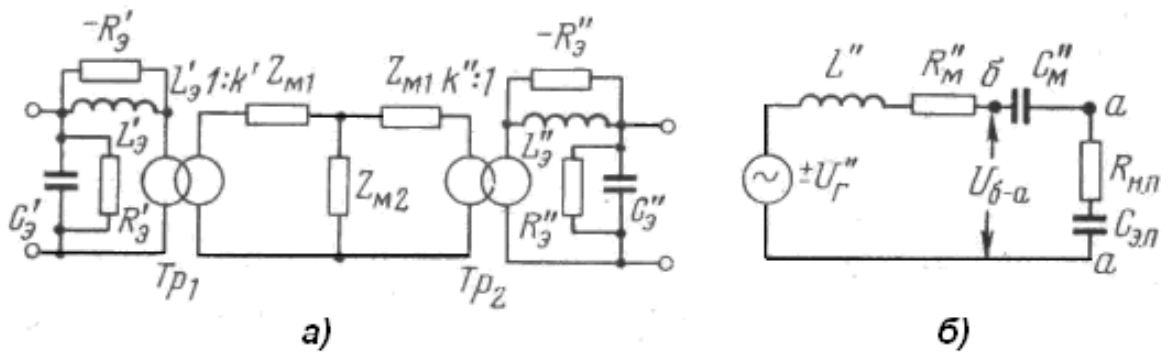


Рисунок 2.12 - Еквівалентні схеми п'єзоелектричних трансформаторів

Введемо обмеження, вважаючи, що робоча частота лежить в околиці резонансної частоти. Нехай збудження трансформатора здійснюється від джерела е.р.с. і, крім того, його навантаження  $R_H$  активне. Винесемо ідеальні трансформатори  $Tr_1$  і  $Tr_2$ . Зневажимо опорами діелектричних утрат  $R'_э$  і  $R''э$  в порівнянні з ємнісними опорами відповідно ємностей  $C'_э$  і  $C''э$ . Рівнобіжне коло між вхідними затискачами  $a - a$  можна перетворити в послідовне. Потім, відкинувши як непотрібні трансформатори  $Tr_1$  і  $Tr_2$ , одержимо схему послідовного коливального контуру, зображену на рисунку 2.12,б. Параметри цього контуру можна записати:

$$C_{э.п.} = \frac{1 + \omega^2 \cdot C_э'^2 \cdot R_H^2}{\omega^2 \cdot C_э'' \cdot R_H^2} \quad (2.26)$$

$$R_{H.п.} = \frac{R_H}{\omega^2 \cdot C_э'^2 \cdot R_H^2 + 1} \quad (2.27)$$

де  $\omega$  - частота генератора [8,1].

Таким чином, струм у послідовному контурі залежить від величини реактивного опору ємності  $C_{эп}$  й опору  $R_{Hп}$  і, отже, від опору навантаження  $R_H$ .

Повні схеми заміщення для поперечно-поперечного, поперечно-подовжнього і подовжньо-подовжнього типу одношарових п'єзотрансформаторів показані на рисунку 2.13 [1].

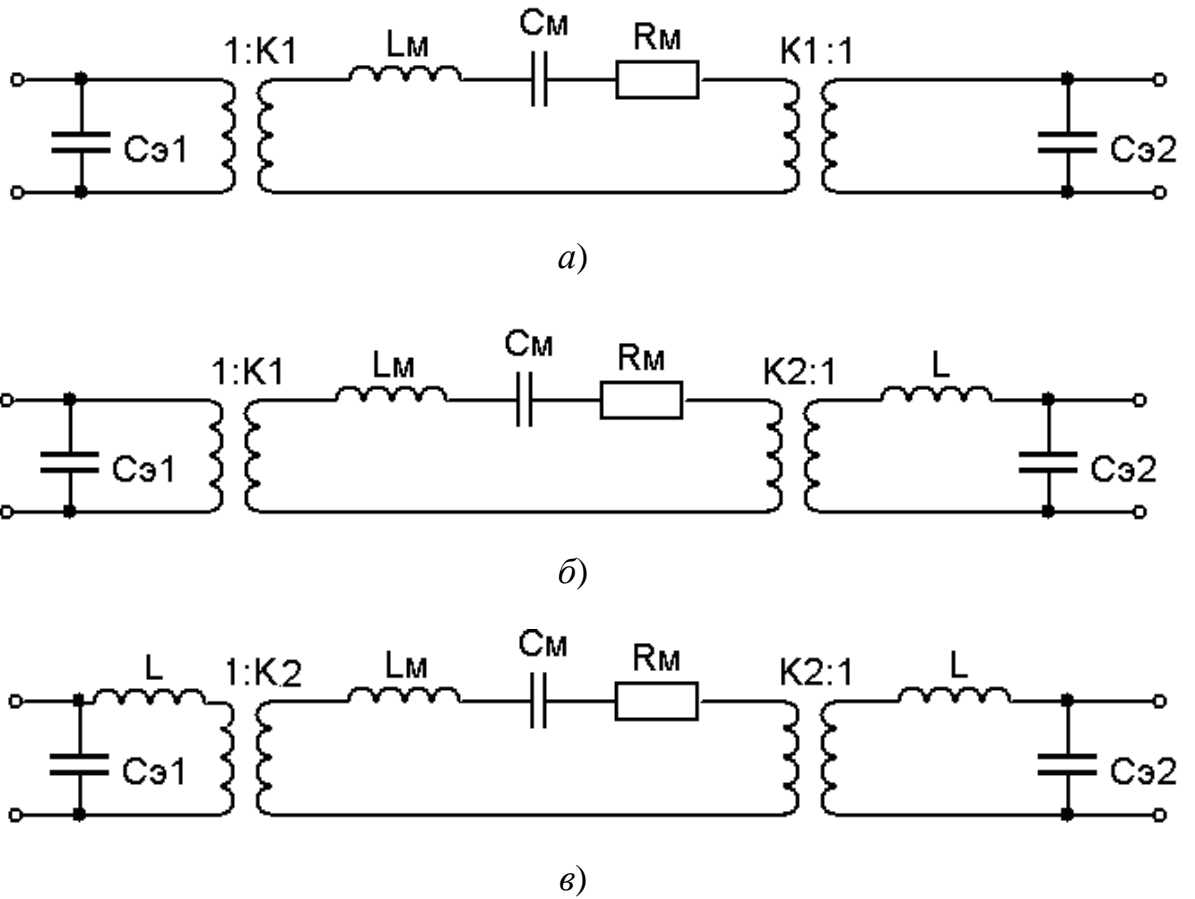


Рисунок 2.13 - Еквівалентні схеми одношарових п'єзотрансформаторів різних типів:

а) - поперечно-поперечного типу; б) - поперечно-подовжнього типу;

в) - подовжньо-подовжнього типу

Формули для розрахунку параметрів схеми заміщення приведені нижче.

$$C_{з1} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1 - k_{31}^2) \cdot b' \cdot L'}{a'} \quad , \quad (2.28)$$

$$C_{з2} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1 - k_{33}^2) \cdot a'' \cdot b''}{L''} \quad , \quad (2.29)$$

$$L = \frac{1}{w^2 \cdot C_{з2}} \quad , \quad (2.30)$$

$$k_1 = 2 \cdot b' \cdot d_{31} \cdot Y_1^E \quad , \quad (2.31)$$

$$k_2 = \frac{2 \cdot k_{33}^2 \cdot a'' \cdot b''}{g_{33} \cdot L''} , \quad (2.32)$$

$$z_0 = a' \cdot b' \cdot \sqrt{\rho \cdot Y_1^E} , \quad (2.33)$$

$$C_M = \frac{L'}{\pi^2 \cdot a' \cdot b' \cdot Y_1^E} . \quad (2.34)$$

Перша мода коливань:

$$R_M = \frac{2 \cdot \pi \cdot z_0}{Q_M} , \quad (2.35)$$

$$L_M = 4 \cdot a' \cdot b' \cdot L' \cdot \rho . \quad (2.36)$$

Друга мода коливань:

$$R_M = \frac{\pi \cdot z_0}{Q_M} \quad (2.37)$$

$$L_M = a' \cdot b' \cdot L' \cdot \rho \quad (2.38)$$

де  $\varepsilon_{33}^T$  – діелектрична проникність;

$k_{31}$  – поперечний коефіцієнт електромеханічного зв'язку;

$k_{33}$  – подовжній коефіцієнт електромеханічного зв'язку;

$b', b''$  – ширина збудника та генератора відповідно;

$L', L''$  – довжина збудника та генератора відповідно;

$a', a''$  – товщина збудника та генератора відповідно;

$\omega$  – кругова частота;

$d_{33}, g_{33}$  – п'єзоелектричні модулі;

$Y_1^E$  – модуль Юнга;

$\rho$  – щільність;

$Q_M$  – механічна добротність.

Дана еквівалентна схема, а також методика розрахунку її параметрів, не враховує багат шаровість п'єзотрансформаторів. У джерелах [9, 25, 26] представлена одна з можливих схем заміщення багат шарового п'єзотрансформатора. Дана схема представлена на рисунку 2.14.

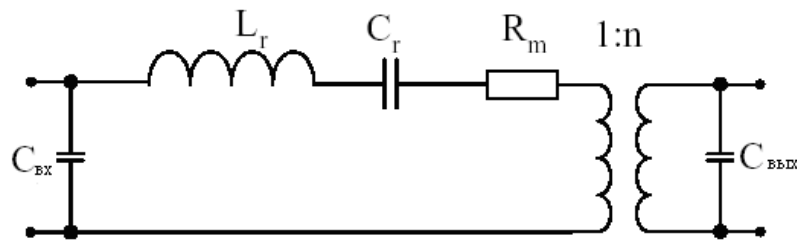


Рисунок 2.14 - Еквівалентна схема п'єзотрансформатора

Дана схема являє собою спрощену еквівалентну схему п'єзотрансформатора, що працює поблизу резонансної частоти. Тому що коефіцієнт трансформації ( $K_u$ ) багат шарового п'єзотрансформатора значно перевищує  $K_u$  одношарового, то внаслідок цього дана умова повинна відбитися на коефіцієнті підсилення в еквівалентній схемі.

Коефіцієнт підсилення п'єзотрансформатора залежить від коефіцієнта електромеханічного зв'язку, кількості шарів, товщини і довжини багат шарової частини п'єзотрансформатора, і виражається формулою:

$$n = \frac{L' \cdot m}{a} \cdot k_p, \quad (2.40)$$

де  $L'$  - довжина багат шарової частини п'єзотрансформатора;

$m$  - кількість шарів;

$a$  - товщина багат шарової частини п'єзотрансформатора;

$k_p$  - коефіцієнт електромеханічного зв'язку.



Як видно з формули (2.40), коефіцієнт підсилення збільшується при подовженні трансформатора і збільшенні кількості шарів. Максимальний ефект виходить при більшій кількості шарів маленької товщини і максимальному коефіцієнті електромеханічного зв'язку.

Таким чином, еквівалентна схема заміщення п'єзотрансформатора, яка одержана при з'єднання еквівалентних схем збудника і генератора, складається з трьох частин. Перша частина - електрична, що підключається до джерела живлення, третя теж електрична, до неї підключається навантаження. Між ними знаходиться механічна частина у виді комплексного опору, що може носити ємнісний чи індуктивний характер, звертається в нуль на частоті резонансу. Ці частини п'єзотрансформатора з'єднані між собою ідеальними трансформаторами з різними коефіцієнтами трансформації. Один із трансформаторів є понижуючим, інший підвищувальним.

## **2.2 Дослідження характеристик одношарових і багат шарових п'єзотрансформаторів**

В даний час у закордонній і вітчизняній літературі недостатньо освітлені параметри і характеристики багат шарових п'єзотрансформаторів, на відміну від одношарових.

Таким чином, актуальним є вивчення характеристик багат шарових п'єзотрансформаторів, порівняльний аналіз одношарових і багат шарових п'єзотрансформаторів.

Для досліджень використовувалися багат шарові п'єзотрансформатори напруги поперечно-подовжнього типу, виготовлені з матеріалу ЦТССт-3. Для порівняльного аналізу паралельно досліджувалися характеристики одношарового п'єзотрансформатора такого ж типу, виготовленого з матеріалу ЦТС-24.

Габаритні розміри досліджуваних трансформаторів приведені в таблиці 2.4 і на рисунку 2.15 а їх параметри в таблиці 2.5.

Таблиця 2.4 - Габаритні розміри п'єзотрансформаторів

Позначення п'єзотрансформатора	Тип	Габаритні розміри		
		Довжина, $L$ , мм	Ширина, $b$ , мм	Товщина, $a$ , мм
1	ТП-РМ 400602	$40 \pm 0,5$	$6 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
2	ТП-РМ 2004017	$20 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,2$
3	ТП-Р1 800603	$80 \pm 0,1$	$6 \pm 0,4$	$3 \pm 0,2$

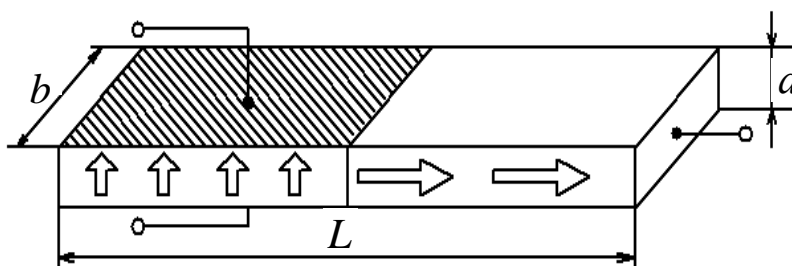


Рисунок 2.15- Габаритні розміри п'єзоелектричного трансформатора

Таблиця 2.5 – Параметри п'єзоелектричних трансформаторів

Позначення п'єзотрансформатора	Частота основного резонансу, кГц	Електрична ємність вихідної секції, пФ	Тангенс кута діелектричних втрат вхідної секції, не більше	Вхідна напруга, $V_{\text{эфф}}$	Вихідна напруга, не менше кВ, при 100 МОм
1	35 – 45	10-14	0,008	5	2,5
2	84 – 90	4-7	0,008	5	2,5
3	19-22	5-7	0,01	60	3,0

Зовнішній вид трансформаторів, які досліджуються, приведений на рисунку 2.16. Схема для дослідження п'єзотрансформатора приведена на рисунку 2.17.

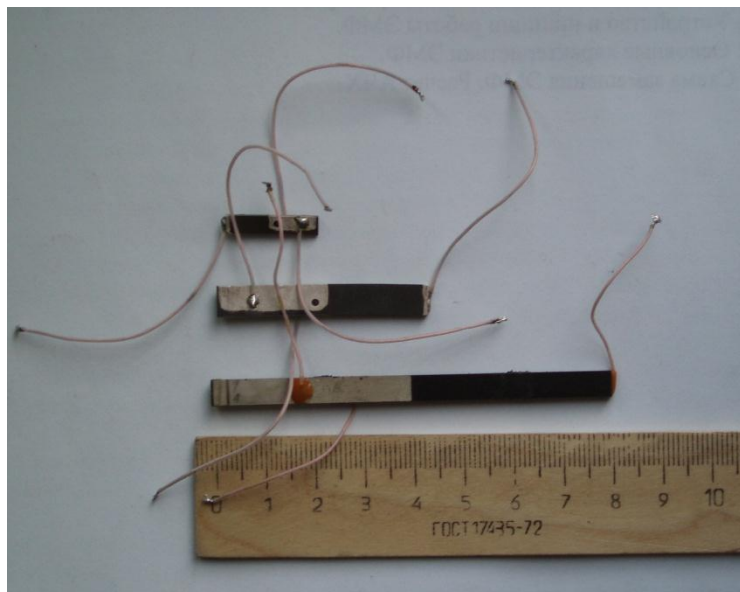


Рисунок 2.16 - Зовнішній вид трансформаторів, які досліджуються

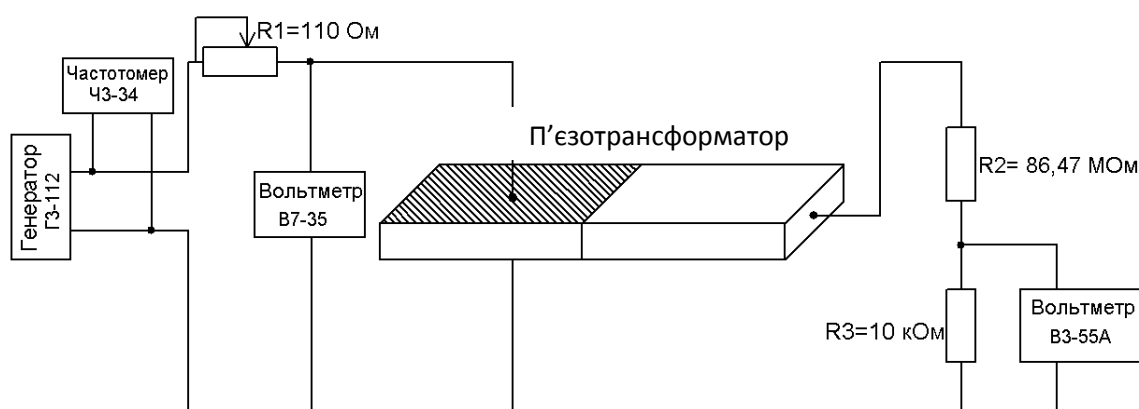


Рисунок 2.17 - Схема включення для дослідження п'єзотрансформаторів

За допомогою низькочастотного генератора сигналів ГЗ-112 відбувалось настроювання п'єзотрансформаторів на резонансну частоту. Контроль частоти здійснювався частотоміром ЧЗ-34. Напряга на вході вимірювалась вольтметром В7-35. За допомогою дільника у вихідній секції ( $R3 = 10 \text{ кОм}$  і  $R2 = 86,47 \text{ МОм}$ ) вимірялася напряга у вихідному ланцюзі п'єзотрансформатора. Виміри на виході на дільнику проводилися за допомогою вольтметра ВЗ-55А. У ролі навантаження використовувався резистор опором  $86,47 \text{ МОм}$ .

Зовнішній вид стенду і вимірювальної апаратури приведені на рисунках 2.18 і 2.19.

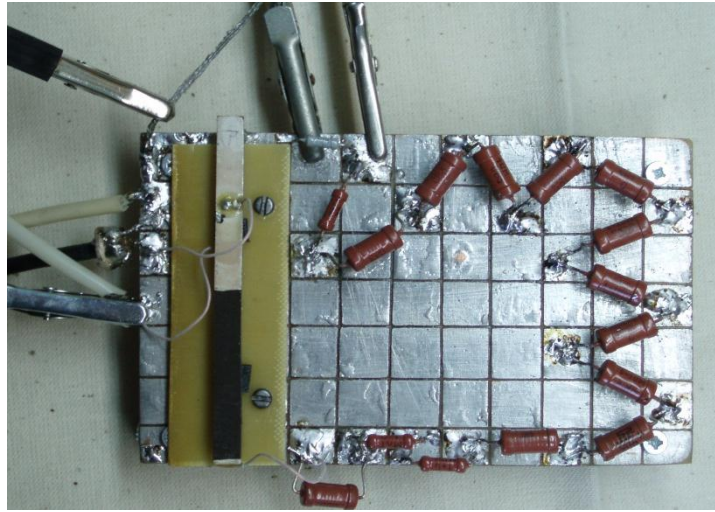


Рисунок 2.18 – Зовнішній вид стенду

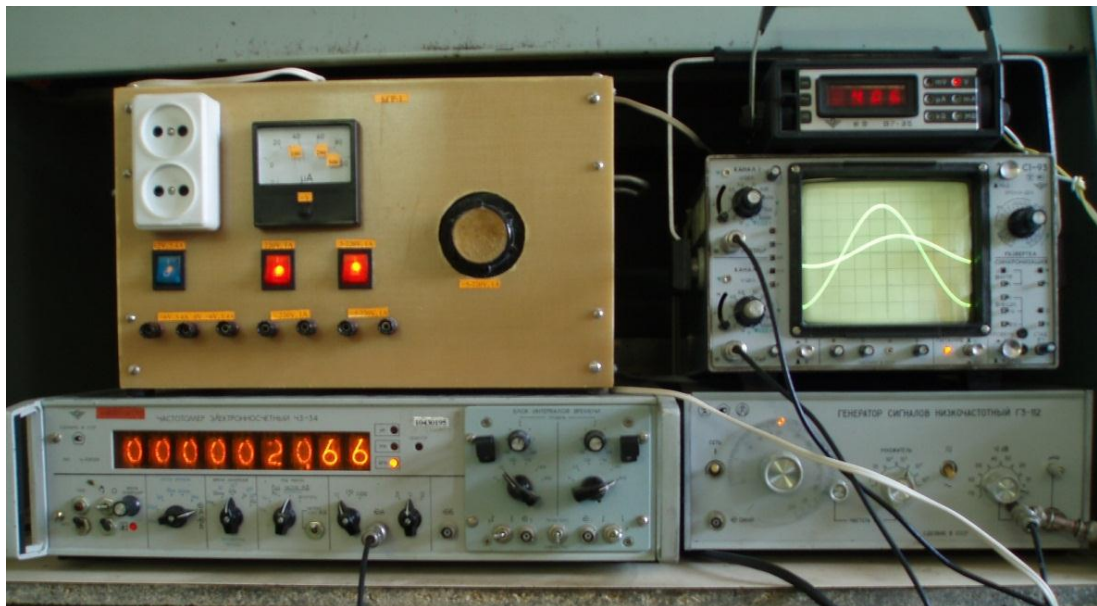


Рисунок 2.19 – Зовнішній вид вимірювальної апаратури

Попередньо були визначені частоти основного резонансу, обмірювана ємність вхідної і вихідної секції п'єзотрансформаторів і проведене порівняння їх з даними, що приводить фірма-виробник. Результати вимірів наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Результати вимірів п'єзотрансформаторів

Позначення п'єзотрансформатора	Резонансна частота, кГц		Ємність вхідної секції, пФ		Ємність вихідної секції, пФ	
	(теор)	(практ)	(теор)	(практ)	(теор)	(практ)
1	35 - 45	40,724	-	48000±1,9	10-14	8±0,32
2	84 - 90	91,569	-	1,5±0,06	4-7	8±0,32
3	19-22	21,536	1000-1200	860±34,4	5-7	4,5±0,18

У ході досліджень були встановлені залежності коефіцієнта трансформації  $K_U$  від частоти, знята фазо-частотная багат шарового п'єзотрансформатора, побудована залежність  $U_{\text{вих}}$  від  $U_{\text{вих}}$  і залежність  $K_U$  від опору навантаження.

Як уже відзначалося вище, конструкція несиметричних перетворювачів являє собою найбільший інтерес.

Так коефіцієнти трансформації  $K_U$  в режимі ідеального електричного холостого ходу для симетричних конструкцій п'єзотрансформаторів при опорі навантаження  $R_H \rightarrow \infty$  визначаються по нижче приведеним формулам.

Для подовжньо-подовжнього типу

$$Ku_0 = \frac{4 \cdot Q_M \cdot k_{33}^2}{\pi^2} \approx 0.4 \cdot G_{33}, \quad (2.41)$$

де  $Q_M$  - механічна добротність;

$k_{33}$  - коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

Для поперечно-поперечного типа

$$Ku_0 = \frac{4 \cdot Q_M \cdot k_{31}^2}{\pi^2} (1 - k_{31}^2) \approx \frac{0.4 \cdot G_{31}}{(1 - k_{31}^2)}, \quad (2.42)$$

де  $G_{ij} = Q_M \cdot k_{ij}^2$ .

З наведених вище формул випливає, що коефіцієнт трансформації симетричної конструкції не залежить від розмірів п'єзотрансформатора, а визначається тільки значеннями параметрів п'єзоматеріала.

Для несиметричних конструкцій п'єзотрансформаторів комбінованого типу коефіцієнт трансформації істотно залежить від геометричних розмірів. Для п'єзотрансформаторів струму поперечно-подовжньої конструкції коефіцієнт трансформації дорівнює

$$Ku_0 = \frac{4 \cdot Q_M}{\pi^2} \cdot \frac{Y_3^E Q_{33} d_{31}}{1 - k_{33}^2} \cdot \frac{l''}{a''} \approx 0.4 \cdot Q_M k_M k_r, \quad (2.43)$$

де  $d_{31}$  - п'єзоелектрична постійна ;

$Q_M k_M$  - коефіцієнт, що залежить від фізичних параметрів п'єзокераміки;

$k_r$  - коефіцієнт геометрії  $\left(\frac{l''}{a''}\right)$ ;

$l''$  - довжина подовжньої частини п'єзотрансформатора;

$a''$  - товщина п'єзотрансформатора [24].

Виходячи з формули (2.43) коефіцієнт трансформації пропорційний довжині подовжньої частини п'єзотрансформатора. Збільшення коефіцієнта трансформації є одним з основних напрямків при створенні нових конструкцій п'єзотрансформаторів.

Виявляється, що максимальна вихідна напруга, що генерується на виході п'єзотрансформатора, пропорційна відстані між обкладинками генератора. Для оцінки властивостей матеріалу цю напругу відносять до одиниці довжини чи товщини в залежності від конструкції. Наприклад, п'єзоелемент

Розена з промислового матеріалу ЦТС-23 має питому граничну допустиму напругу 1000 В/см. Отже, щоб одержати 11000 В, довжина генератора повинна дорівнювати 11 см і приблизно така ж повинна бути довжина збудника. У ряді випадків такі розміри п'єзоелемента бувають неприйнятними.

Одним з рішень такої проблеми є створення багатошарових п'єзотрансформаторів. Дана конструкція дозволяє забезпечити високу щільність потужності п'єзотрансформатора (до 40-50 Вт/см<sup>2</sup>), і відповідно зменшити габарити в 3-5 разів у порівнянні з традиційним одношаровим п'єзотрансформатором, а також дозволяє працювати на низкоомне навантаження з високим ККД [10,26].

Так можна припустити, що для багатошарового п'єзотрансформатора у коефіцієнті геометрії ще повинне враховуватися кількість шарів. Тоді формула (2.43) буде мати вигляд

$$Ku_0 = \frac{4 \cdot Q_M}{\pi^2} \cdot \frac{Y_3^E Q_{33} d_{31}}{1 - k_{33}^2} \cdot \frac{l'' \cdot m}{a''} \approx 0.4 \cdot Q_M k_M k_r, \quad (2.44)$$

де  $m$  - кількість шарів;

$l''$  - довжина багатошарової частини п'єзотрансформатора;

$a''$  - товщина багатошарової частини п'єзотрансформатора.

Для зняття залежності  $K_U$  від частоти фіксувалася вхідна і вихідна напруга при різних частотах. Коефіцієнт трансформації обчислювався по формулі:

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} \quad (2.45)$$

Результати дослідження залежності  $K_U$  від частоти для багатошарових і одношарового п'єзотрансформаторів приведені в таблиці 2.7 і на рисунку 2.20.

Таблиця 2.7 - Значення параметрів п'єзотрансформаторів  
на резонансних частотах

Позначення п'єзотрансформатора	Резонансна частота, Гц	Вхідна напруга, В	Вихідна напруга, В	$K_{TP}$
1	40724	3,12	3458,80	1108,59
	82817	2,87	4323,50	1506,45
2	91569	2,92	4150,56	1421,43
	180150	2,53	3631,74	1435,47
3	21536	3,92	951,17	242,64
	43704	3,7	2248,22	607,62

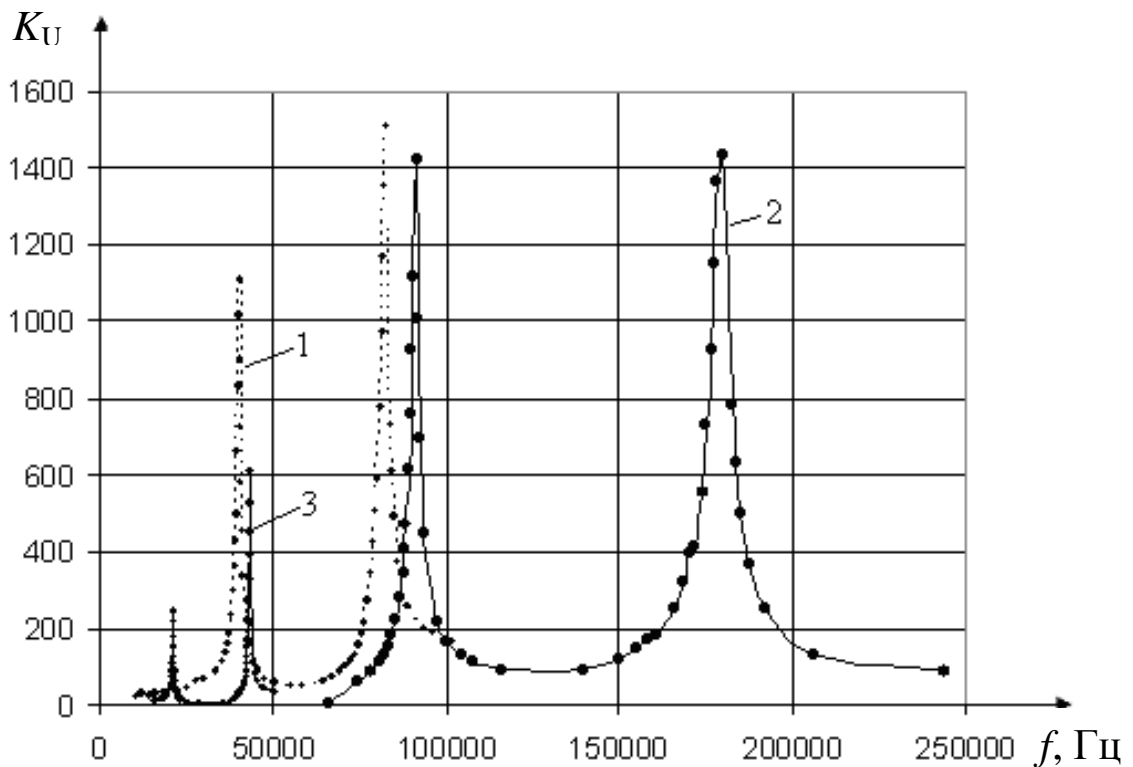


Рисунок 2.20- Залежність коефіцієнта трансформації від частоти  
1 – багат шаровий п'єзотрансформатор №1; 2 – багат шаровий п'єзотрансформатор №2; 3 – одно шаровий п'єзотрансформатор №3



Як видно з рисунку 2.20 і таблиці 2.7, коефіцієнт трансформації багат шарових п'єзотрансформаторів у кілька разів більше  $K_U$  одношарових. Так, наприклад, відношення максимального значення  $K_U$  для багат шарового п'єзотрансформатора №1 і одношарового п'єзотрансформатора №3 складає 4,6 і 2,5 на першій і другій моді коливань відповідно.

Передача енергії від збудника до генератора залежить від механічної добротності п'єзоматеріала  $Q_M$ , що характеризує втрати механічної енергії в резонаторі. Параметром п'єзоелектричного трансформатора є електромеханічна добротність  $Q_{EM}$ . Отримані залежності були використані для визначення добротності п'єзотрансформатора, що розраховуються за формулою

$$Q_{EM} = \frac{f_r}{\Delta f}, \quad (2.46)$$

де  $f_r$  - резонансна частота;

$\Delta f$  - різниця частот на рівні 0,707 максимальної величини коефіцієнта трансформації [3].

Результати розрахунків приведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Добротність п'єзотрансформаторів

Позначення п'єзотрансформатора	Резонансна частота, Гц	Добротність
1	40724	103
	82817	91
2	91569	93
	180150	79
3	21536	80
	43704	72

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що добротність максимальна для всіх п'єзотрансформаторів на основному резонансі.

Також встановлено, що добротність багат шарових п'єзотрансформаторів незначно перевищує добротність одношарового.

У ході досліджень була підтверджена залежність резонансної частоти п'єзотрансформаторів від їхніх габаритних розмірів.

Як відомо, резонансна частота для подовжніх по довжині  $L$  коливань залежить від довжини резонатора і визначається формулою

$$f_r = m \cdot \frac{N}{L} \quad (2.47)$$

де  $m$  - номер моди збуджених коливань;

$N$  - постійна частота п'єзокерамічного матеріалу;

$L$  - довжина п'єзотрансформатора [1].

Така залежність апріорі не очевидна для поперечно-подовжнього типу п'єзотрансформатора. Для досліджень даної залежності використовувалася група багат шарових і одношарових п'єзотрансформаторів напруги поперечно-подовжнього типу. Результати досліджень представлені в таблиці 2.9 і на рисунку 2.30.

Таблиця 2.9 - Габаритні розміри і частота п'єзотрансформаторів

Позначення п'єзотрансформатора	Довжина, L, мм	Резонансна частота, кГц
ТП-РМ 400602	40±0,5	40,724
ТП-РМ 2004017	20±0,2	91,569
ТП-Р1 800603	80±0,1	21,536
ТП-Р1 381002	38±0,1	44,584
ТП-РМ 701002	70±1,0	23,521
ТП-РМ 350502	35±0,5	46,632

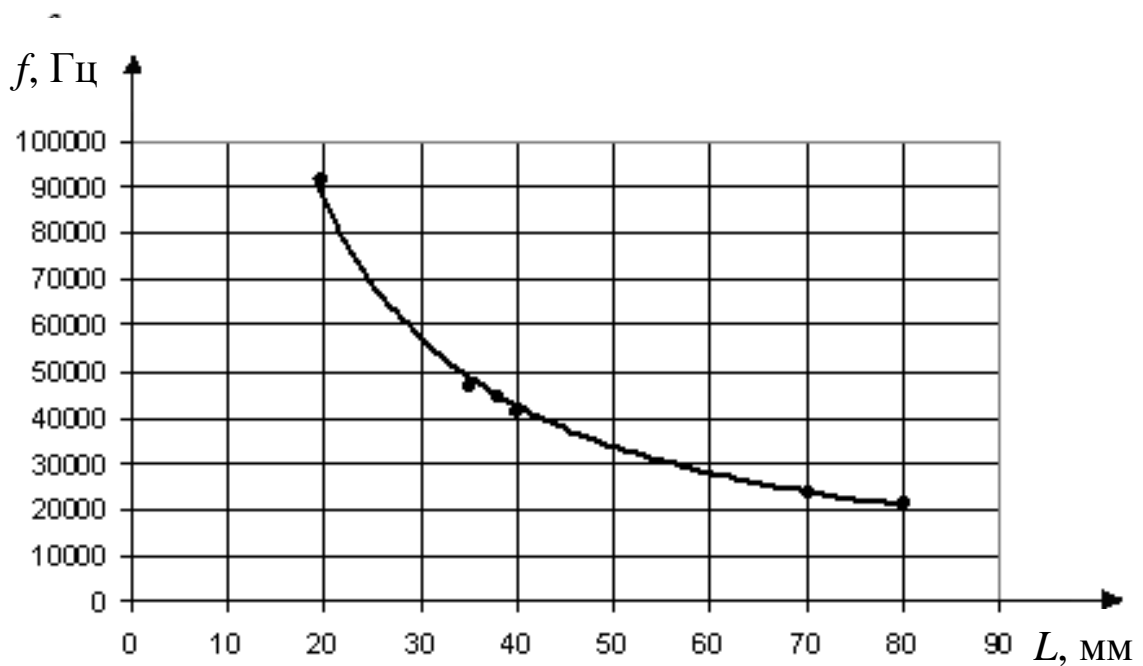


Рисунок 2.30 - Залежність частоти п'єзотрансформаторів від довжини

З графіка видно, що залежність довжини п'єзотрансформаторів від частоти має нелінійний характер, який описаний формулою (2.47).

Також становить інтерес вивчення залежності вихідної напруги п'єзотрансформатора від вхідної. Ця залежність має лінійний характер, однак, починаючи з деяких значень вхідної напруги, вихідна напруга входить у насичення, а при подальшому збільшенні вхідного зменшується. Це повинно враховуватися при побудові схем на базі п'єзотрансформатора.

На рисунку 2.31 приведені графіки залежності вихідної напруги від вхідної, що отримані на основній резонансній частоті.

З приведених графіків видно, що залежності носять лінійний характер у заданому інтервалі вхідних напруг. Подальше збільшення вхідної напруги обмежилося можливістю генератора. Очевидно також явна перевага багат шарових п'єзотрансформаторів перед одношаровими. Так, наприклад, при вхідній напрузі  $U_{вх} = 2В$  вихідна напруга багат шарових п'єзотрансформаторів №1 і №2 перевищує вихідну напругу одношарового п'єзотрансформатора №3 у 4 і 7 разів відповідно.

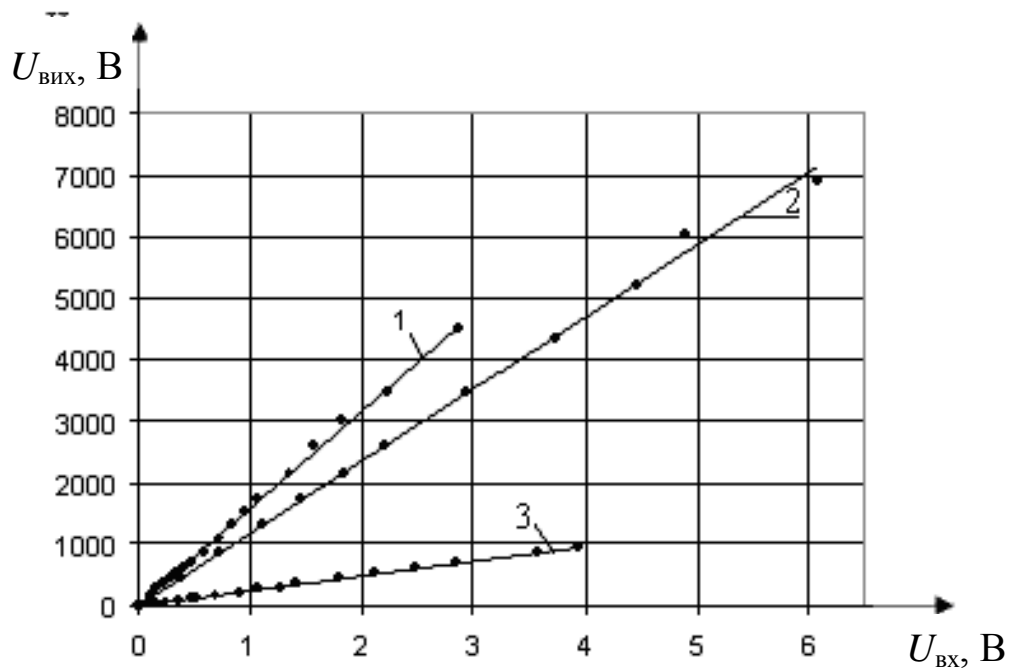


Рисунок 2.40 - Залежність вихідної напруги від вхідної

1 – багат шаровий п'єзотрансформатор №1; 2 – багат шаровий п'єзотрансформатор №2; 3 – одно шаровий п'єзотрансформатор №3

При підключенні до п'єзоелектричного трансформатора з боку входу чи виходу активного опору в механічну систему вноситься додаткове загасання. Це приводить до того, що коефіцієнт трансформації залежить не тільки від частоти, але і від опорів навантаження і джерела [1]. Отже, залежність коефіцієнта трансформації від опору навантаження також важлива і повинна враховуватися при розробці пристроїв із застосуванням п'єзотрансформаторів.

На рисунку 2.41 приведені графіки залежності коефіцієнта трансформації від опору навантаження.

Як видно із рисунка, залежності мають практично лінійний характер при  $R_H \leq 100$  МОм. При значеннях навантаження  $R_H \geq 100$  МОм зміна опору навантаження у велику сторону практично не змінює коефіцієнт трансформації як для багат шарового п'єзотрансформатора, так і одно шарового.

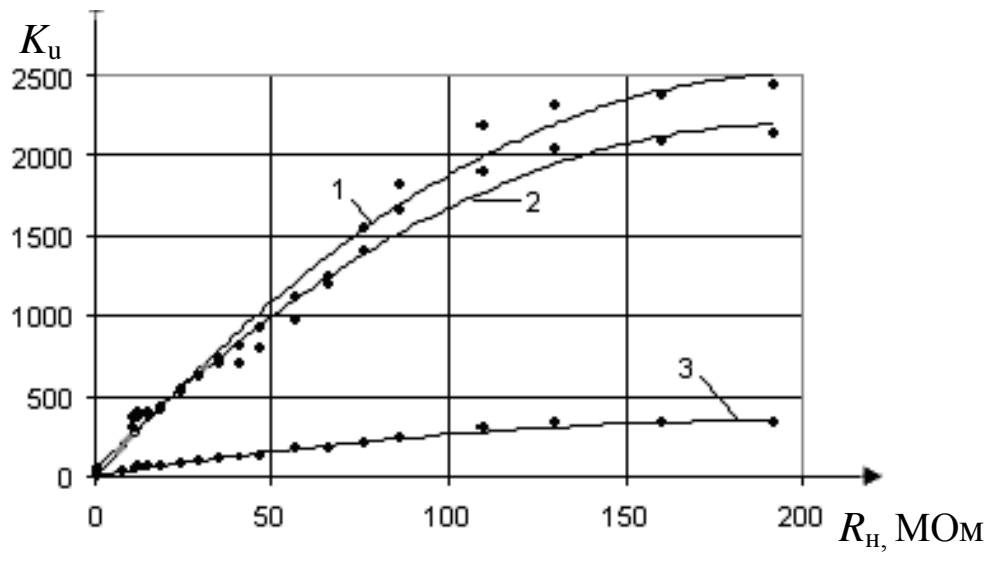


Рисунок 2.41 - Залежність коефіцієнта трансформації від опору навантаження

1 – багат шаровий п'єзотрансформатор №1; 2 – багат шаровий п'єзотрансформатор №2; 3 – одношаровий п'єзотрансформатор №3

Найбільш неоднозначною характеристикою є фазо-частотна характеристика п'єзотрансформатора. Аналізуючи вітчизняну і закордонну літературу, було знайдено кілька прикладів зображення фазо-частотної характеристики п'єзотрансформатора. Тому, щоб одержати достовірні дані фазо-частотна характеристика вимірювалась двома способами.

Так як фазо-частотна характеристика п'єзотрансформатора знімається між вхідним струмом і вихідною напругою запропоновано розглянути, поперше, вхідну частину п'єзотрансформатора.

Вхідну частину п'єзотрансформатора можна представити схемою заміщення представлена на рисунку 2.42.

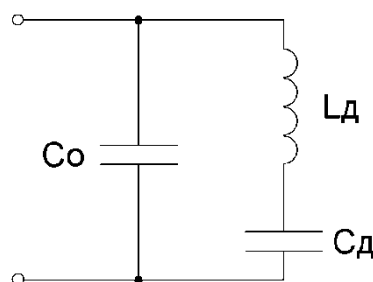


Рисунок 2.42 - Схема заміщення вхідної частини п'єзотрансформатора

У даній схемі має місце послідовний і паралельний резонанс. Так послідовний резонанс визначається формулою

$$f_s = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_d \cdot C_d}}, \quad (3.8)$$

паралельний резонанс

$$f_p = f_s \cdot \sqrt{1 + \frac{C_d}{C_0}}, \quad (3.9)$$

де  $L_d$  - динамічна індуктивність, котра визначається формулою

$$L_d = \frac{1}{2\pi^2 \cdot f_s^2 \cdot C_d}, \quad (3.10)$$

$C_d$  - динамічна ємність, котра визначається формулою

$$C_d = \left( \frac{f_p^2}{f_s^2} - 1 \right) \cdot C_0, \quad (3.11)$$

$C_0$  - вхідна ємність п'єзотрансформатора [27].

Теоретична фазо-частотна характеристика, де фазовий зсув знімався між вхідним струмом і вхідною напругою схеми, представлена на рисунку 2.43.

Експериментально була отримана фазо-частотна характеристика, де фазовий зсув знімався між вхідним струмом і вхідною напругою. Дана характеристика представлена на рисунку 2.44. Характеристики знімалися з багатополосного п'єзотрансформатора №1.

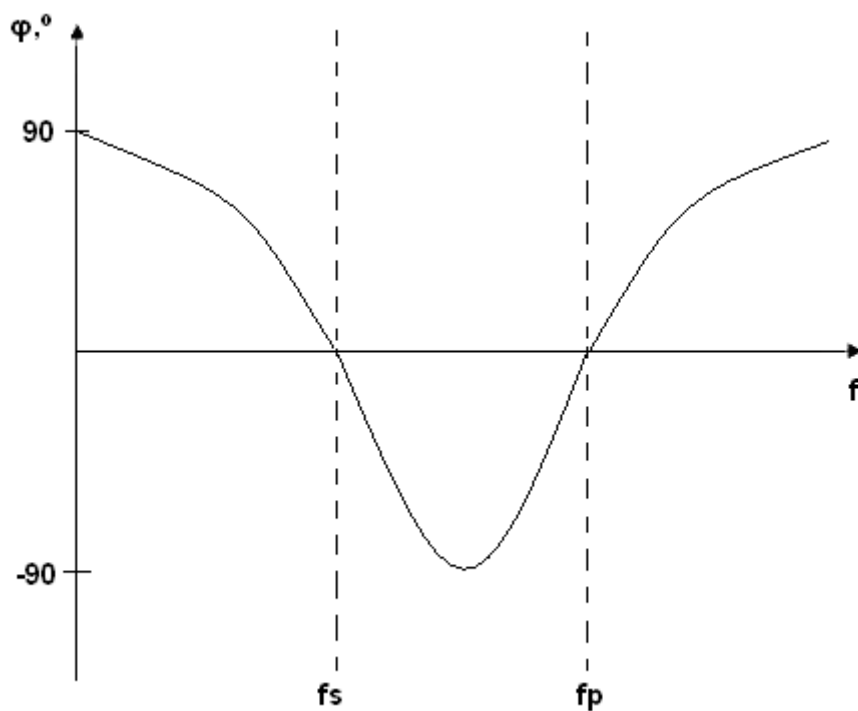


Рисунок 2.43- Теоретична фазо-частотна характеристика (фазовий зсув між вхідним струмом і вхідною напругою)

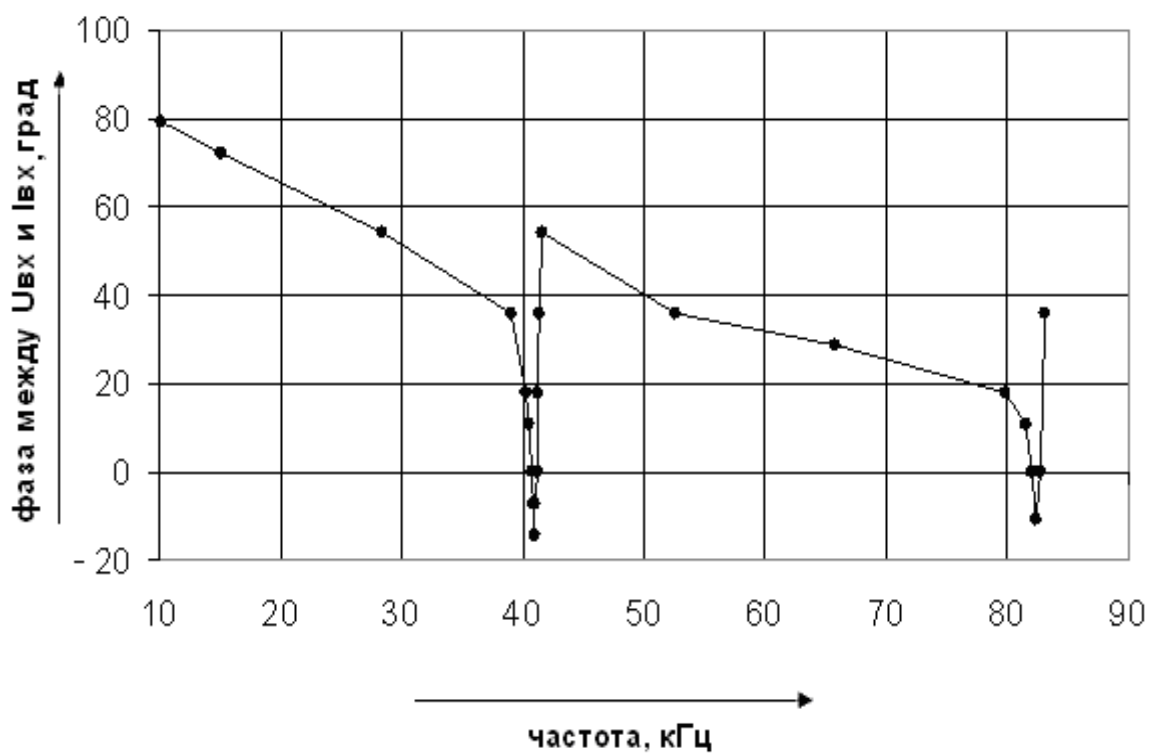


Рисунок 2.44 - Експериментальна фазо-частотная характеристика

Як видно з рисунка 2.44 частоти послідовного і паралельного резонансу лежать досить близько, як для першого, так і для другого резонансу. Резонансна частота знаходиться між цими частотами. Повний вхідний опір до частоти послідовного резонансу носить ємнісний характер. На частотах послідовного і паралельного резонансу він носить активний характер, а між цими частотами - індуктивний характер.

Експериментально побудована фазо-частотная характеристика, де фазовий зсув знімався між вхідною і вихідною напругою, представлена на рисунку 2.45 .

Як видно з характеристики представлені на рисунку 2.45 частоти першого і другого резонансу відповідає фазовий зсув  $-90$  і  $-270$  градусів.

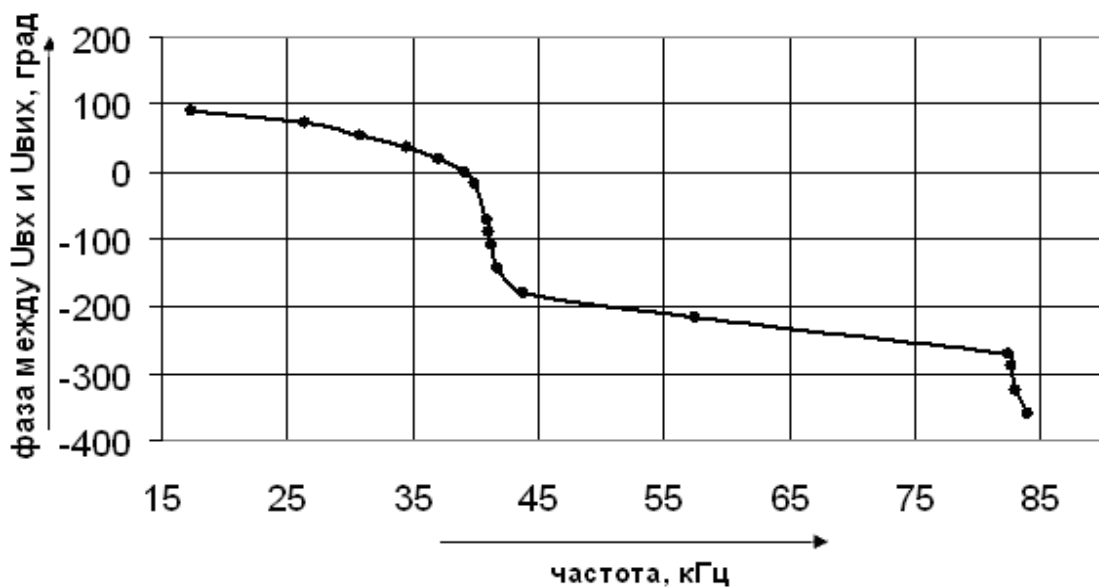


Рисунок 2.45 - Експериментально побудована фазо-частотная характеристика

Для отримання фазового зсуву між вхідним струмом і вихідною напругою із графіка, представленого на рисунку 2.45, віднімали графік, представлений на рисунку 2.44. На рисунку 2.46 зображена дана характеристика під номером 2. Характеристика, яка була отримана експериментальним шляхом зображена на рисунку 2.46 під номером 1.



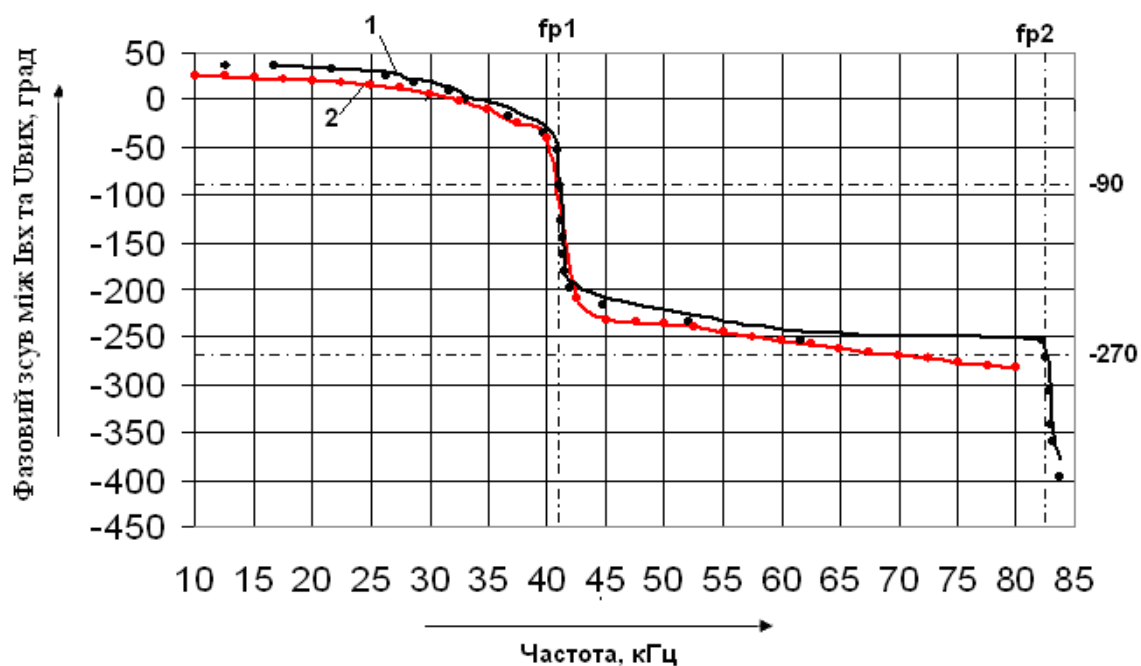


Рисунок 2.46 – Фазо-частотні характеристики п'єзотрансформатора №1:

1 - отримана експериментальним шляхом;

2 - отримана експериментально-розрахунковим шляхом

На рисунку 2.47 зображена фазо-частотная характеристика багатошарового п'єзотрансформатора №2, де фазовий зсув знімався між вхідним струмом і вихідною напругою.

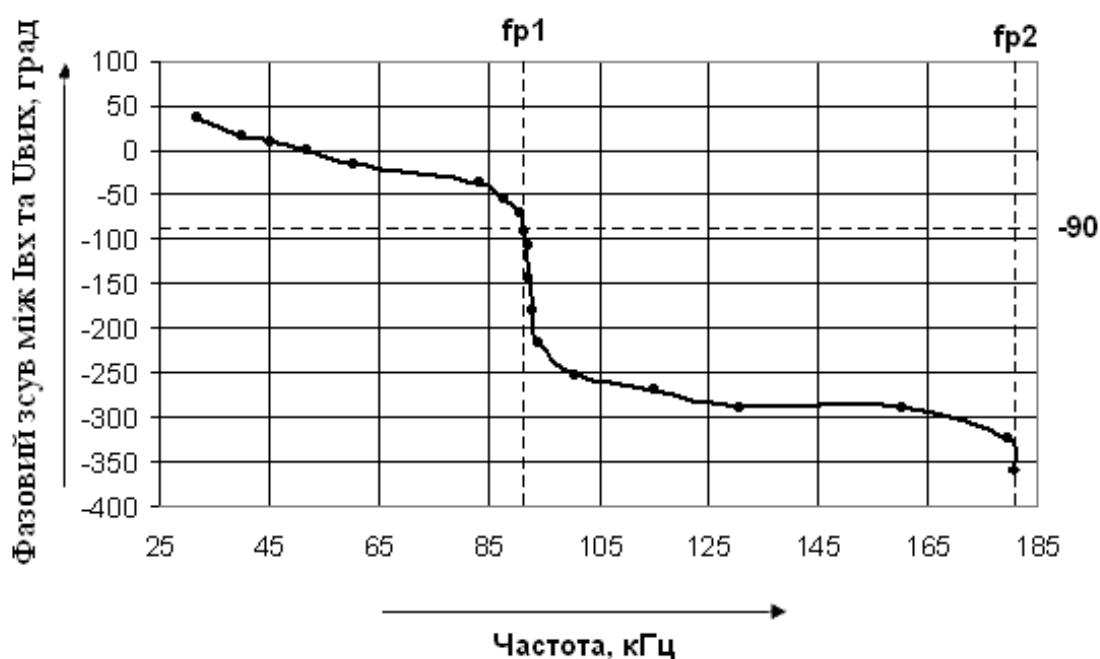


Рисунок 2.47 – Фазо-частотна характеристика п'єзотрансформатора №2

Як видно з рисунку 2.47, вигляд фазо-частотної характеристики п'єзотрансформатора №2 відповідає характеру фазо-частотної характеристики п'єзотрансформатора №1.

В цілому можна відмітити адекватність отриманих характеристик, а також те, що в далечині від резонансу п'єзотрансформатор веде себе як ємність, а на частоті резонансу й у його околиці його повний вхідний опір може носити як активний, так індуктивний характер.

### 2.3 Висновки за розділом

Аналіз існуючих методів дослідження п'єзоперетворювачів показав існування таких методів як математичний метод кількісного аналізу, варіаційний метод, метод дослідження п'єзоелементів за допомогою схеми заміщення і, нарешті, експериментальні методи.

Найбільш точним і досить нескладним методом дослідження п'єзоелементів є експериментальний метод. Одержання результату експериментальним шляхом містить у собі як методи визначення параметрів п'єзоматеріалів, так і методи визначення параметрів та дослідження основних характеристик п'єзотрансформаторів.

Різноманітність форм і розмірів п'єзоелементів приводить до необхідності проведення різних іспитів і вимірів. В умовах промислового виробництва п'єзоелементів варто проводити типові і серійні вимірювання. Сучасний розвиток техніки і вимірювальної апаратури дає можливість швидко і надійно проводити обчислення необхідних параметрів.

Вимірювання п'єзоелементів при їх випуску у виробництві не включають і не замінюють випробування п'єзоперетворювачів у приладах і пристроях, у яких вони використовуються. Нові умови застосування п'єзоелементів вимагають подальших досліджень і вимірів.

Отже, є необхідним дослідження п'єзотрансформаторів в умовах його застосування. Становить інтерес уточнення даних наданих заводом виготов-

лювачем. Так з огляду на резонансний характер роботи п'єзотрансформаторів необхідно досить точно визначення резонансної частоти. Для розробки моделі п'єзотрансформатора необхідно також визначити вхідну і вихідну ємність.

Також становить інтерес можливість дослідження п'єзотрансформаторів за допомогою зняття і побудови основних його характеристик, таких як амплітудно-частотних, фазо-частотних і навантажувальних і інших характеристик.

Альтернативним методом дослідження п'єзотрансформаторів є дослідження його за допомогою еквівалентних схем заміщення. На основі аналізу вітчизняної і закордонної літератури були вибрані схеми заміщення одношарового та багатшарового п'єзотрансформатора, дороблена еквівалентна схема багатшарового п'єзотрансформатора.

Одним з найбільш простих способів дослідження п'єзотрансформатора є побудова моделі пристрою за допомогою програм прикладного моделювання, використовуючи еквівалентні схеми заміщення. Становить інтерес порівняння експериментальних даних і даних моделювання.

Вибір п'єзотрансформатора для конкретного пристрою, визначається його основними характеристиками, до яких відносяться амплітудно-частотні, фазо-частотні характеристики й інші залежності.

У ході проведеної роботи були отримані основні характеристики одношарових і багатшарових п'єзотрансформаторів, а саме: залежності коефіцієнта трансформації від частоти, побудовані регульовальні і навантажувальні характеристики. Знята фазо-частотна характеристика багатшарових п'єзотрансформаторів. Також була експериментально перевірена і підтверджена залежність резонансної частоти п'єзотрансформатора від його довжини.

З фазо-частотних характеристик були отримані частоти послідовного і паралельного резонансу, тобто визначений електричний резонанс та антирезонанс. Встановлено, що механічний резонанс лежить між електричним резонансом та антирезонансом.

Отримані залежності коефіцієнта трансформації від частоти показали резонансний характер роботи п'єзотрансформатора та їх високу добротність. Було встановлено, що добротність максимальна для всіх п'єзотрансформаторів на основному резонансі. Також встановлено, що добротність багат шарових п'єзотрансформаторів незначно перевищує добротність одношарового.

Дослідження показали, що коефіцієнт трансформації п'єзотрансформаторів залежить не тільки від частоти, але і від опору навантаження. Залежності коефіцієнта трансформації від частоти мають практично лінійний характер до певного значення опору навантаження, далі характеристика входить у насичення. Ця залежність коефіцієнта трансформації від опору навантаження також важлива і повинна враховуватися при розробці пристроїв із застосуванням п'єзотрансформатора.

Також були встановлено, що вхідна ємність багат шарових п'єзотрансформаторів значно перевищує одношарових, а вихідна ємність багат шарових та одношарових п'єзотрансформаторів практично однакова.

З отриманих характеристик можна зробити висновок про перевагу багат шарових п'єзотрансформаторів перед одношаровими. Так багат шарові п'єзотрансформатори при розмірах в 2-4 рази менших одношарових п'єзотрансформаторів мають майже в 4-6 разів більший коефіцієнт трансформації.

Таким чином, враховуючи вищесказане, можна зробити висновок, що багат шарові п'єзотрансформатори є перспективним класом електронної техніки. Враховуючи переваги багат шарових перед одношаровими можна припустити, що останні можуть бути замінені багат шаровими. Вибір п'єзотрансформатора для конкретного пристрою визначається його електричними характеристиками та економічною доцільністю.

## ТРЕТІЙ РОЗДІЛ

### РОЗРОБКА МОДЕЛІ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

#### 3.1 Розробка моделі п'єзотрансформатора

Одним з методів аналізу роботи п'єзотрансформаторів є моделювання на ЕОМ за допомогою різних програмних пакетів, для чого використовуються еквівалентні схеми заміщення п'єзотрансформаторів. В існуючій літературі розглядаються різні схеми заміщення одношарових п'єзотрансформаторів і тільки в останні роки за рубежом були початі спроби розрахунку і моделювання еквівалентної схеми заміщення багатошарових п'єзотрансформаторів [6].

Одним з методів аналізу роботи п'єзотрансформаторів є моделювання на ЕОМ за допомогою різних програмних пакетів, для чого використовуються еквівалентні схеми заміщення п'єзотрансформаторів.

Для моделювання використовувалися експериментальні зразки п'єзотрансформаторів напруги поперечно-подовжнього типу. Їхні основні характеристики приведені в таблицях 3.1-3.2.

Таблиця 3.1 - Габаритні розміри п'єзотрансформаторів, які досліджувались

Позначення п'єзотрансформатора	Габаритні розміри		
	Довжина, $L$ , мм	Ширина, $B$ , мм	Товщина, $H$ , мм
1	$20 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,2$
2	$80 \pm 0,1$	$6 \pm 0,4$	$3 \pm 0,2$

Таблиця 3.2 - Результати вимірів п'єзотрансформаторів, які досліджувались

Позначення п'єзотранс- форматора	Резонансна частота, кГц		Ємність вхідної секції, пФ		Ємність вихід- ної секції, пФ	
	(теор.)	(практ.)	(теор.)	(практ.)	(теор.)	(практ.)
1	84 - 90	91,569	-	$48000 \pm 0,06$	4-7	$8 \pm 0,32$
2	19-22	21,536	1000-1200	$860 \pm 34,4$	5-7	$4,5 \pm 0,18$

Багатошаровий п'єзотрансформатор №1 виготовлений з матеріалу ЦТССт-3, одношаровий п'єзотрансформатор №2 з матеріалу ЦТС-24. Основні параметри п'єзоелектричних матеріалів, необхідні для розрахунку еквівалентної схеми і відповідно для моделювання п'єзотрансформаторів, приведені в таблиці 3.3 [28].

Таблиця 3.3 - Фізичні й електричні властивості п'єзоматеріалів

Параметр	Символ	Одиниця виміру	VA-420	VA-400
			ЦТС-24	ЦТССт-3
Діелектрична проникність	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1	900	1400
Тангенс кута діелектричних втрат	$\text{tg } \delta$	$10^{-2}$	0,0075	0,0080
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	$K_p$	1	0,50	0,53
	$K_{31}$	1	0,30	0,31
	$K_{33}$	1	0,60	0,67
П'єзоелектричний модуль	$d_{31}$	$10^{-12} \text{ C/N}$	100	130
	$d_{33}$		340	290
	$g_{31}$	$10^{-3} \text{ (V-m)/N}$	10,7	9,1
	$g_{33}$		26,7	23,4
Частотна постійна	$N_p$	Hz-m	2,3	2,2
Швидкість звуку	$V_E^1$	$10^3 \text{ m/s}$	3,23	3,24
Пружна твердість	$S_{11}^E$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	11,2	12,6
	$S_{33}^E$		15,1	15,5
Коефіцієнт Пуансона	$\sigma$	1	0,30	0,31
Межа механічної міцності при статичному розтяганні/стиску, не менш:	$\sigma_{\text{розт}}$	$10^6 \text{ N/m}^2$	18,6	19,6
	$\sigma_{\text{стиск}}$		343	400
Механічна добротність	$Q_m$	1	500	800
Точка Кюрі	$T_c$	$^{\circ}\text{C}$	270	280
Щільність	$\rho$	$10^3 \text{ kg/m}^3$	7,40	7,40

Моделювання одношарового п'єзотрансформатора №2 проводилося за допомогою пакета OrCAD відповідно до еквівалентної схеми заміщення п'єзотрансформатора, яка представлена на рисунку 2.13,б. Модель п'єзотрансформатора приведена на рисунку 3.1, залежність від частоти, побудована за результатами моделювання й отримана експериментальним шляхом, - на рисунку 3.2.

Параметри моделі  $C_m$ ,  $L_m$ ,  $R_m$ ,  $L$ ,  $K1$  и  $K2$  розраховані по формулах (2.30-2.36), використовуючи необхідні для розрахунку параметри п'єзоелектричних матеріалів, що приведені в таблиці 3.3 (для матеріалу ЦТС-24). Замість розрахункових значення  $C_{s1}$  і  $C_{s2}$  підставлені експериментально обмірювані ємності вхідної і вихідної частини п'єзотрансформатора з таблиці 3.2.

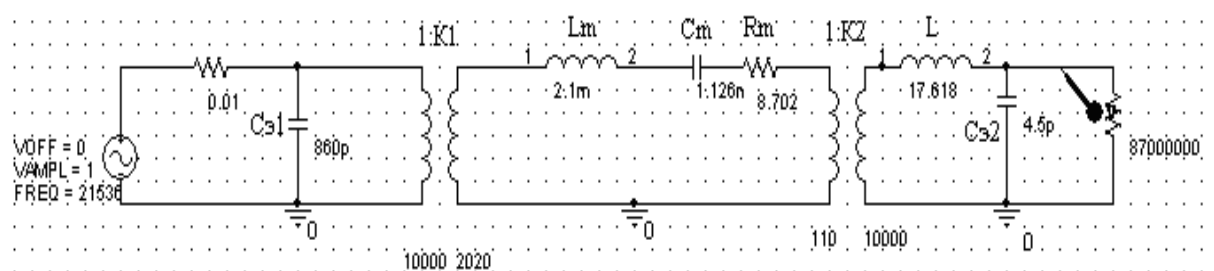


Рисунок 3.1 – Модель одношарового п'єзотрансформатора

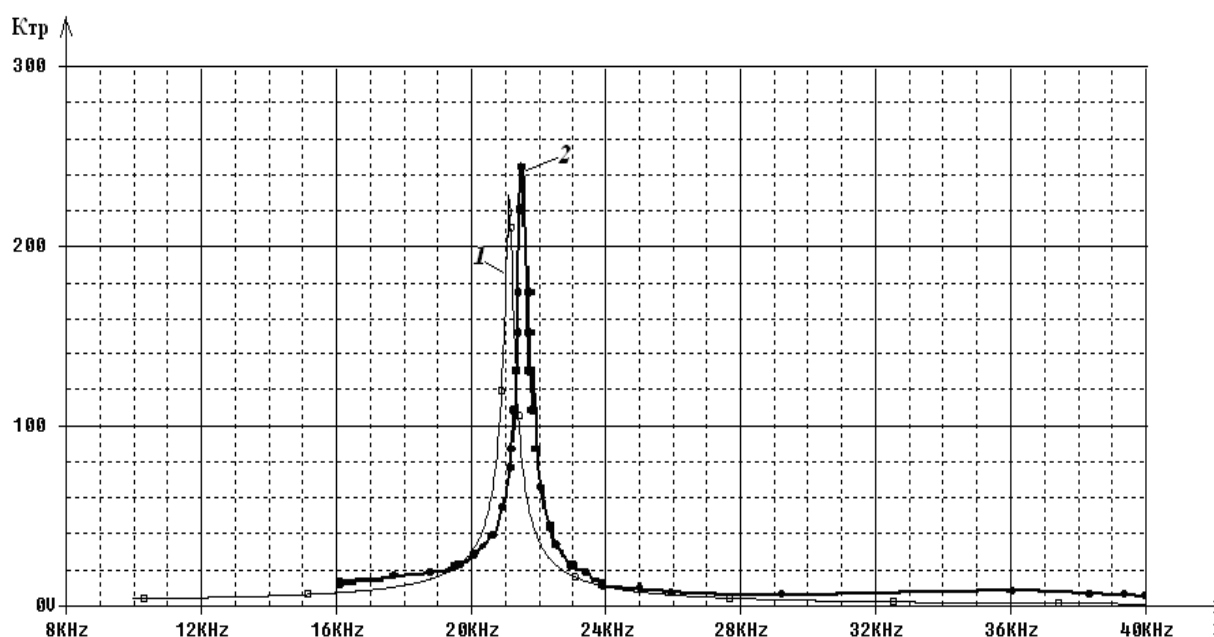


Рисунок 3.2 - Залежність від частоти, побудована за результатами моделювання (крива 1) і отримана експериментальним шляхом (крива 2)

Як видно з рисунку 3.2 частота резонансу моделі практично збігається з резонансною частотою п'єзотрансформатора №2, однак отриманий результат при моделюванні трохи не збігається з результатом експериментального дослідження. Це можна пояснити погрішністю розрахунку і неточних значень постійних, котрі характеризують якість п'єзокераміки.

Отримана відповідність характеристик дозволяє зробити висновок про адекватність фізичного зразка п'єзотрансформатора і його моделі, що, у свою чергу, дає можливість досліджувати п'єзотрансформатор за допомогою даної моделі.

На рисунках 3.3 – 3.4 представлена залежність від частоти при різному опорі навантаження.

З отриманих характеристик видно, що коефіцієнт трансформації залежить не тільки від частоти, але і від опору навантаження. Так само варто вказати, що максимальний коефіцієнт трансформації відповідає максимальному опорі навантаження.

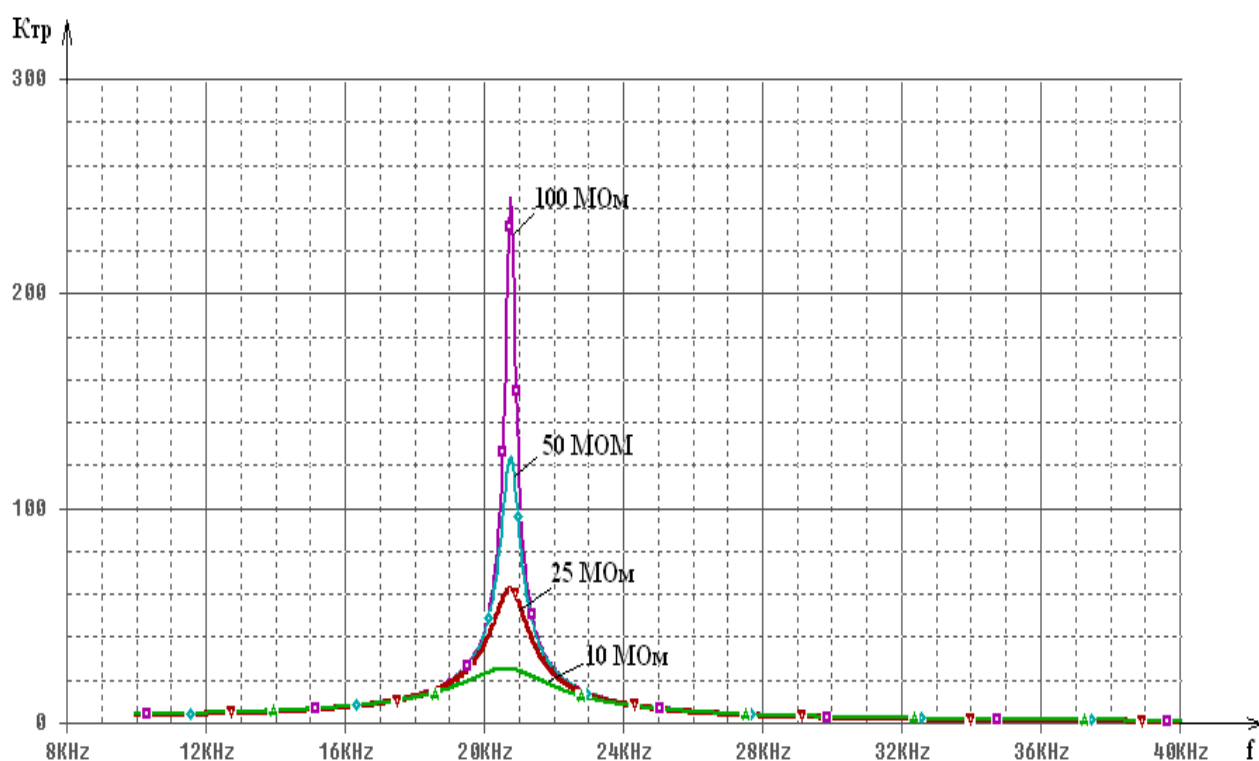


Рисунок 3.3 – Залежність  $K_{тр}$  від частоти при різних опорах навантаження



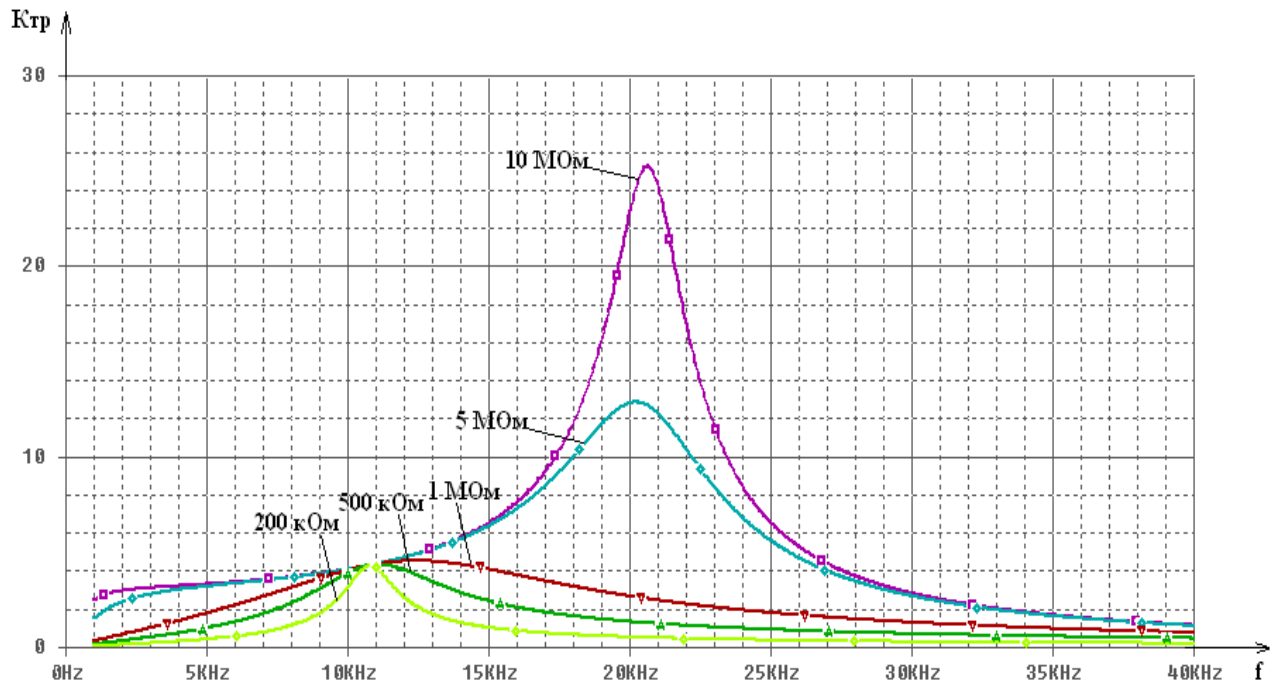


Рисунок 3.4 – Залежність  $K_{tr}$  від частоти при різних опорах навантаження

На рисунку 3.5 представлена фазо-частотна характеристика побудована за результатами моделювання зсуву фаз між вхідною і вихідною напругою.

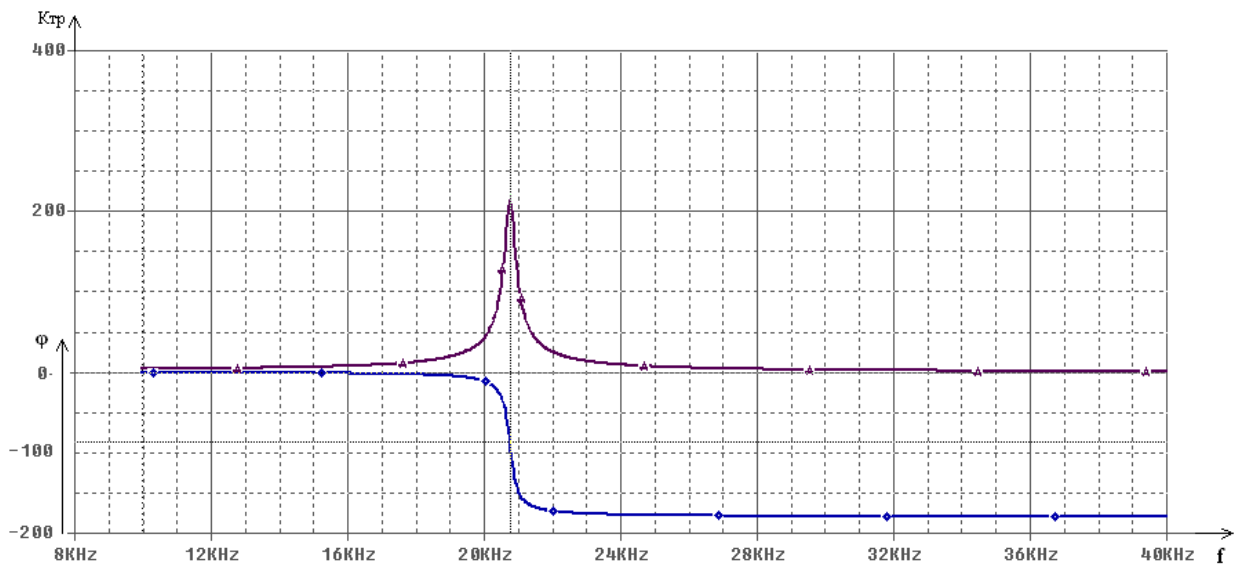


Рисунок 3.5 - Фазо-частотна і амплітудно-частотна характеристики п'єзотрансформатора

Як видно з отриманих характеристик резонансній частоті п'єзотрансформатора відповідає фазовому зсуву  $-90^\circ$ .

Також моделювалася фазо-частотна характеристика, у якій фазовий зсув знімався між вхідним струмом і напругою. Дана характеристика має такий же вид, як і характеристика представлена на рисунку 3.5. На рисунку 3.6 представлена дана фазо-частотна характеристика п'єзотрансформатора у залежності від опору навантаження.

При максимальному опорі навантаження фазо-частотна характеристика має вид круто спадаючої характеристики, при зменшенні опору навантаження характеристика має плавний вид. Поза залежністю від опору навантаження збереглася відповідність резонансної частоти фазовому зсуву  $-90^\circ$ .

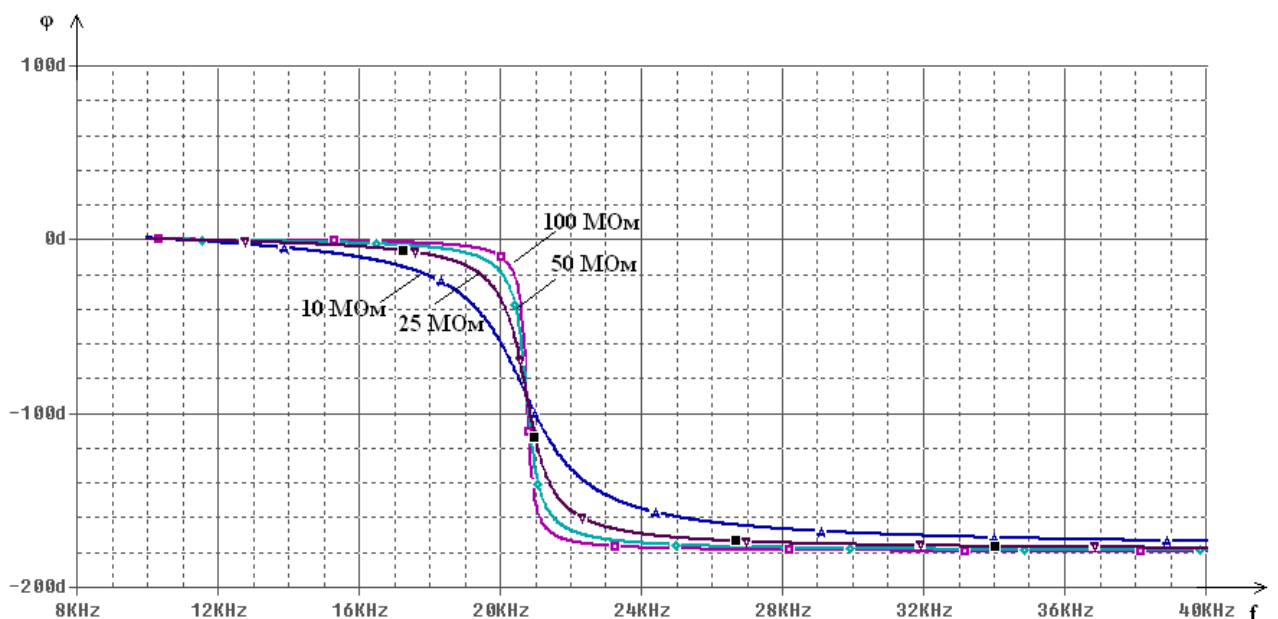


Рисунок 3.6 - Фазо-частотна п'єзотрансформатора при різному опорі навантаження

Також становить інтерес залежність вхідного струму від частоти. Ця залежність і амплітудно-частотна характеристика п'єзотрансформатора представлена на рисунку 3.7.

Вершина залежності вхідного струму від частоти відповідає частоті послідовного або електричного резонансу, провал на даній залежності відповідає частоті паралельного резонансу або електричному антирезонансу.

Відстань між частотами послідовного і паралельного резонансу до деякої міри визначає добротність п'єзотрансформатора. Чим більше різниця між цими частотами, тим ширше амплітудно-частотна характеристика п'єзотрансформатора і відповідно менше добротність [27]. Так частота послідов-

ного резонансу складає 20721 Гц, частота паралельного 21502 Гц, різниця - 781 Гц.

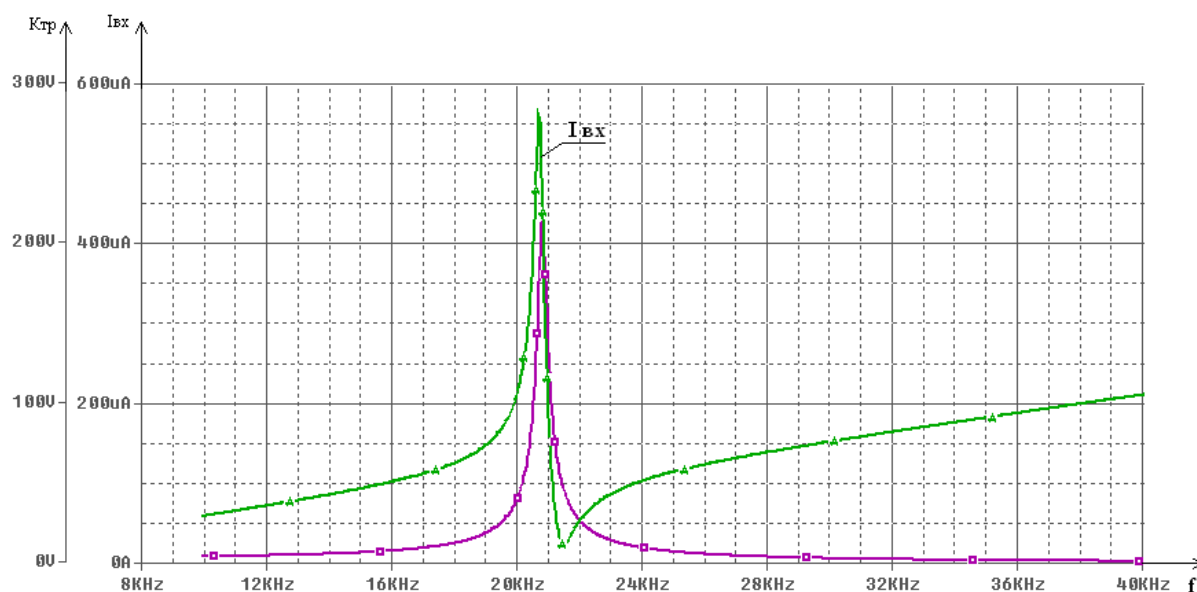


Рисунок 3.7 - Залежність вхідного струму від частоти й амплітудно-частотна характеристика п'єзотрансформатора

На рисунку 3.8 представлена амплітудно-частотна характеристика і залежність вихідного струму від частоти. На рисунку 3.9 зображена також амплітудно-частотна характеристика п'єзотрансформатора і залежність вхідної напруги від частоти.

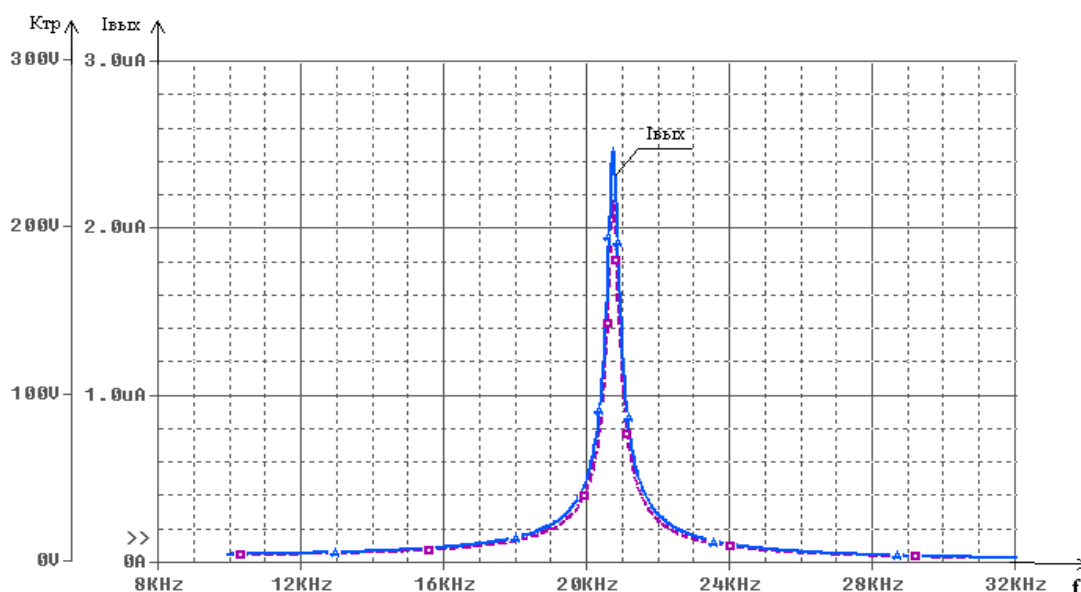


Рисунок 3.8 - Амплітудно-частотна характеристика та залежність вихідного струму від частоти

Як видно з графіків, представлених на рисунку 3.8-3.9, частоті резонансу відповідає мінімальна вхідна напруга і максимальний вихідний струм.

Моделювання багат шарового п'єзотрансформатора проводилося у відповідності двом еквівалентним схемам заміщення. Перша модель складена у відповідності еквівалентній схемі, представленої на рисунку 2.13, б.

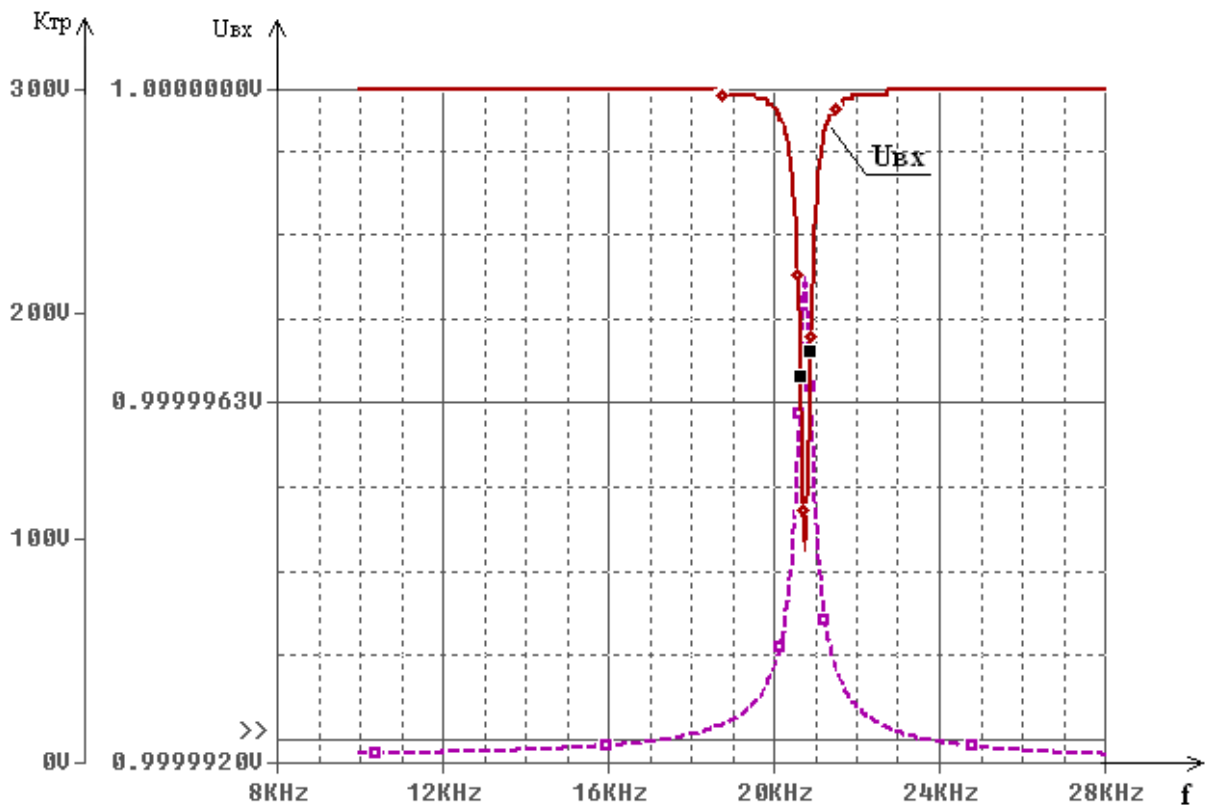


Рисунок 3.9- Амплітудно-частотна характеристика п'єзотрансформатора і залежність вхідної напруги від частоти

Також як і для моделі одношарового п'єзотрансформатора, параметри моделі  $C_m$ ,  $L_m$ ,  $R_m$ ,  $L$ ,  $K_1$  и  $K_2$  розраховані по формулах (2.30-2.36), використовуючи необхідні для розрахунку параметри п'єзоелектричних матеріалів, що приведені в таблиці 4.3 (для матеріалу ЦТССт-3). Замість розрахункових значень  $C_{э1}$  і  $C_{э2}$  підставлені експериментально обмірювані ємності вхідної і вихідної частини п'єзотрансформатора, які приведені в таблиці 3.2. Дана модель зображена на рисунку 3.10

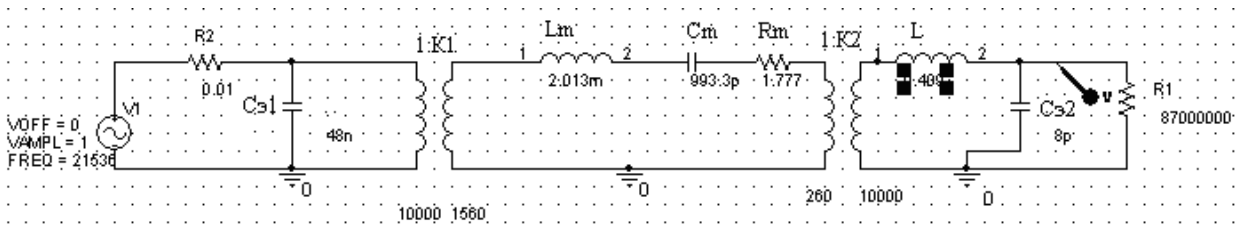


Рисунок 3.10 – Перша модель багатозарового п'єзотрансформатора

Друга модель складена у відповідності еквівалентній схемі, представленій на рисунку 2.14.

Параметри моделі  $C_m$ ,  $L_m$ ,  $R_m$ ,  $L$ , розраховані по формулах (2.30, 2.34-2.36). Замість розрахункових значень  $C_{\varepsilon 1}$  і  $C_{\varepsilon 2}$  підставлені експериментально обмірювані ємності вхідної і вихідної частини п'єзотрансформатора, що приведені в таблиці 3.2. Коефіцієнт підсилення  $n$  розрахований по формулі (2.40). Дана модель зображена на рисунку 3.11.

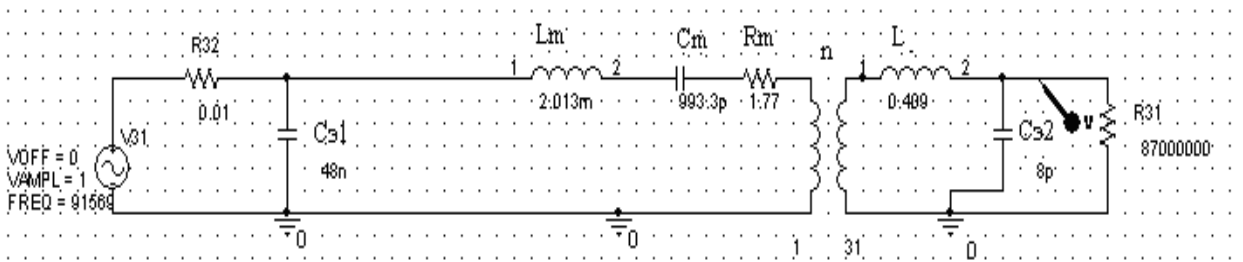


Рисунок 3.11 - Друга модель багатозарового п'єзотрансформатора

Залежності коефіцієнта трансформації від частоти, побудовані за результатами моделювання й експериментальна характеристика, представлені на рисунку 3.12.

Як видно з рисунка 3.12, найбільш точною по відношенню заміщення багатозарового п'єзотрансформатора є друга модель, так як вона враховує багатозаровість п'єзотрансформатора, що прямо виражається великим коефіцієнтом трансформації. Однак отриманий результат при моделюванні і також добротність моделі не збігається з результатом дослідження. Це свідчить

про необхідність доробки вихідної моделі і методики розрахунку. Далі буде проводитися дослідження другої моделі.

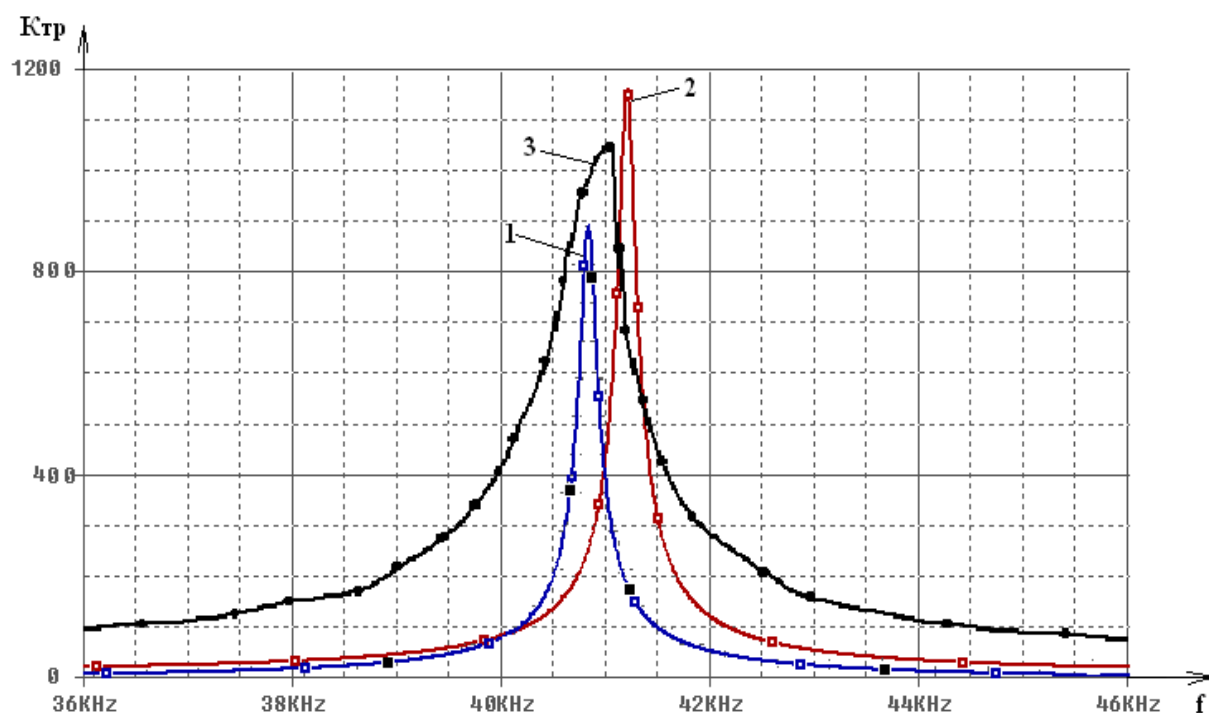


Рисунок 3.12 - Залежності коефіцієнта трансформації від частоти, побудовані за результатами моделювання й експериментальна характеристика:

- 1 - залежність коефіцієнта трансформації від частоти, яка побудована за результатами моделювання використовуючи першу модель;
- 2 – т.ж.с., що 1, але для другої моделі;
- 3 - експериментальна характеристика.

З аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що добротність моделі дуже велика і не відповідає експериментально отриманому значенню. Як було сказано вище, добротність п'єзотрансформатора до деякої міри визначає відстань між частотами послідовного і рівнобіжного резонансу. Чим менше різниця між цими частотами, тим вузьче амплітудно-частотна характеристика і відповідно більша добротність. Це добре ілюструється графіком показаному на рисунку 3.13, де представлена залежність вхідного струму і коефіцієнта трансформації від частоти.

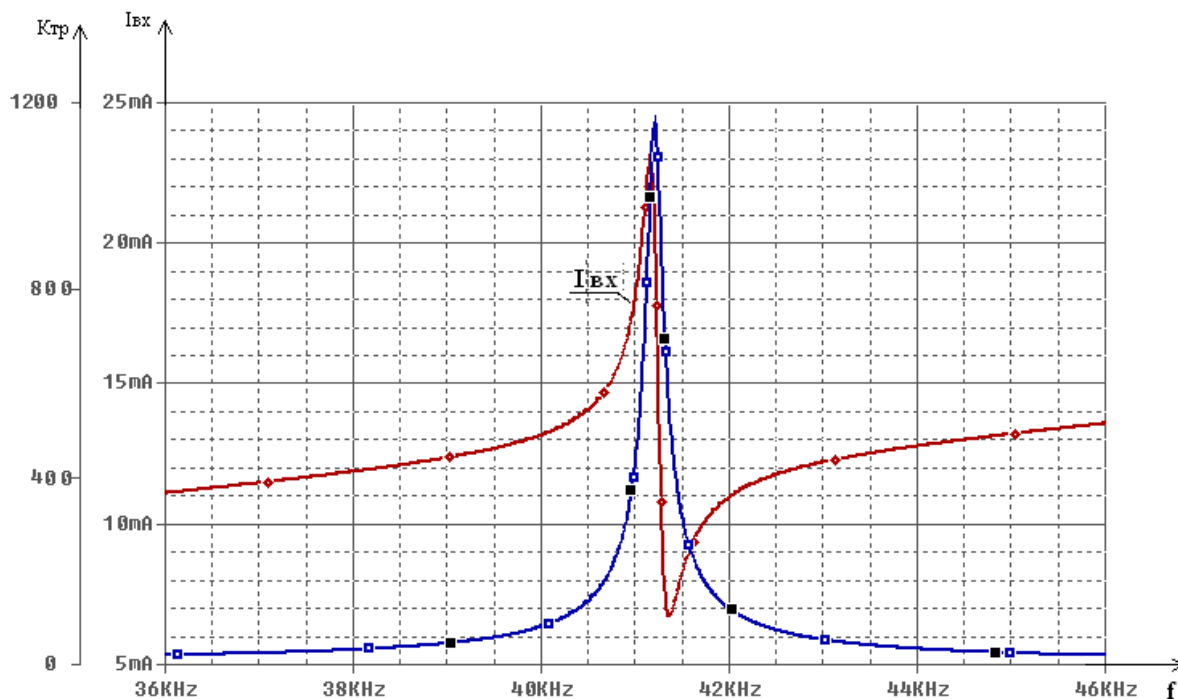


Рисунок 3.13 - Залежність вхідного струму від частоти й амплітудно-частотна характеристика багат шарового п'єзотрансформатора

З графіка можна визначити частоту послідовного і паралельного резонансів. Так, частота послідовного резонансу складає 91572 Гц, частота паралельного - 91852 Гц, різниця - 280 Гц. Цей результат можна порівняти з отриманими значеннями для одношарового п'єзотрансформатора. Так для одношарового ця різниця складала 781 Гц, а для багат шарового 280 Гц. Це відобразилося на АЧХ моделі.

### 3.2 Висновки за розділом

У ході аналізу моделі одношарового п'єзотрансформатора були отримані основні характеристики, а саме: залежності коефіцієнта трансформації від частоти при різних опорах навантаження та фазо-частотні характеристики.

Були порівняні залежності коефіцієнта трансформації від частоти, отримані експериментальним шляхом та шляхом моделювання. Відповід-

ність даних характеристик дозволяє зробити висновок про адекватність фізичного зразка п'єзотрансформатора і його моделі. Це, у свою чергу, дало можливість досліджувати п'єзотрансформатори за допомогою даної моделі.

Була підтверджена залежність коефіцієнта трансформації від частоти та опору навантаження. Варто вказати, що максимальний коефіцієнт трансформації відповідає максимальному опору навантаження. При зменшенні опору навантаження падає не тільки коефіцієнт трансформації, а й змінюється резонансна частота.

З фазо-частотних характеристик були отримані частоти послідовного та паралельного резонансу, тобто визначений електричний резонанс та антирезонанс. Встановлено, що механічний резонанс лежить між електричним резонансом та антирезонансом. Також було встановлено, що фазовий зсув між вхідним струмом та вихідною напругою дорівнює  $-90$  градусів на основній резонансній частоті (що було підтверджено експериментально). Отримані фазо-частотні характеристики при різних опорах навантаження. Показано, що при зменшенні опору фазо-частотна характеристика стає більш пологою.

Також були побудовані моделі багат шарового п'єзотрансформатора, використовуючи різні еквівалентні схеми. Використовуючи одну з них були отримані достатньо адекватні результати. Дана модель враховує багат шаровість п'єзотрансформатора, що відобразилося у збільшенні коефіцієнта трансформації. Однак отриманні значення коефіцієнта трансформації та добротності моделі не повністю відповідають експериментально отриманим значенням цих параметрів. Це свідчить про необхідність доробки моделі і методики розрахунку.



## ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показав, що вибір виду конструкції п'єзотрансформатора визначається в основному вимогами до його вхідних і вихідних електричних параметрів, а також до інших характеристик, таких як, стабільність параметрів, міцність, діапазон частот, температурна стабільність, вартість і т.д. Попережно-подовжня конструкція п'єзотрансформатора представляє особливий практичний інтерес. Коефіцієнт трансформації цієї конструкції може дорівнювати декільком тисячам, а конструкція багат шарового п'єзотрансформатора дозволяє забезпечити високу щільність потужності п'єзотрансформатора, і відповідно зменшити габарити в 3-5 разів у порівнянні з традиційним одношаровим п'єзотрансформатором.

Аналіз закордонної і вітчизняної літератури показує, що параметри і характеристики багат шарових п'єзотрансформаторів недостатньо освітлені, на відміну від одношарових.

Аналіз існуючих методів дослідження п'єзоперетворювачів показав існування таких методів як математичний метод кількісного аналізу, варіаційний метод, метод дослідження п'єзоелементів за допомогою схеми заміщення і, нарешті, експериментальні методи.

Найбільш точним і досить нескладним методом дослідження п'єзоелементів є експериментальний метод. Одержання результату експериментальним шляхом містить у собі як методи визначення параметрів п'єзоматеріалів, так і методи визначення параметрів та дослідження основних характеристик п'єзотрансформаторів.

У ході проведеної роботи були отримані основні характеристики одношарових і багат шарових п'єзотрансформаторів, а саме: залежності коефіцієнта трансформації від частоти, побудовані регульовальні і навантажувальні характеристики. Знята фазо-частотна характеристика багат шарових п'єзотрансформаторів. Також була експериментально перевірена і підтверджена залежність резонансної частоти п'єзотрансформатора від його довжини.

З фазо-частотних характеристик були отримані частоти послідовного и паралельного резонансу, тобто визначений електричний резонанс та антирезонанс. Встановлено, що механічний резонанс лежить між електричним резонансом та антирезонансом.

Отримані залежності коефіцієнта трансформації від частоти показали резонансний характер роботи п'єзотрансформатора та їх високу добротність. Було встановлено, що добротність максимальна для всіх п'єзотрансформаторів на основному резонансі. Також встановлено, що добротність багат шарових п'єзотрансформаторів незначно перевищує добротність одношарового.

Дослідження показали, що коефіцієнт трансформації п'єзотрансформаторів залежить не тільки від частоти, але і від опору навантаження. Залежності коефіцієнта трансформації від частоти мають практично лінійний характер до певного значення опору навантаження, далі характеристика входить у насичення. Ця залежність коефіцієнта трансформації від опору навантаження також важлива і повинна враховуватися при розробці пристроїв із застосуванням п'єзотрансформатора.

Також були встановлено, що вхідна ємність багат шарових п'єзотрансформаторів значно перевищує одношарових, а вихідна ємність багат шарових та одношарових п'єзотрансформаторів практично однакова.

З отриманих характеристик можна зробити висновок про перевагу багат шарових п'єзотрансформаторів перед одношаровими. Так багат шарові п'єзотрансформатори при розмірах в 2-4 рази менших одношарових п'єзотрансформаторів мають майже в 4-6 разів більший коефіцієнт трансформації.

У ході аналізу моделі одношарового п'єзотрансформатора були отримані основні характеристики, а саме: залежності коефіцієнта трансформації від частоти при різних опорах навантаження та фазо-частотні характеристики.

Порівняння залежності коефіцієнта трансформації від частоти, отримані експериментальним шляхом та шляхом моделювання показало адекватність фізичного зразка п'єзотрансформатора його моделі.

При моделюванні підтверджена залежність коефіцієнта трансформації від частоти та опору навантаження. Показано, що максимальний коефіцієнт трансформації відповідає максимальному опору навантаження. При зменшенні опору навантаження падає не тільки коефіцієнт трансформації, а й змінюється резонансна частота.

З фазо-частотних характеристик отримані частоти послідовного та паралельного резонансу, тобто визначений електричний резонанс та антирезонанс. Встановлено, що механічний резонанс лежить між електричним резонансом та антирезонансом. Також було встановлено, що фазовий зсув між вхідним струмом та вихідною напругою дорівнює  $-90$  градусів на основній резонансній частоті (що було підтверджено експериментально). Отримані фазо-частотні характеристики при різних опорах навантаження. Показано, що при зменшенні опору фазо-частотна характеристика стає більш пологою.

Для побудови моделі багат шарового п'єзотрансформатора використовувалися різні еквівалентні схеми. Використовуючи одну з них були отримані достатньо адекватні результати. Дана модель враховує багат шаровість п'єзотрансформатора, що відобразилося у збільшенні коефіцієнта трансформації. Однак отриманні значення коефіцієнта трансформації та добротності моделі не повністю відповідають експериментально отриманим значенням цих параметрів. Це свідчить про необхідність доробки моделі і методики розрахунку.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Лавриненко В.В. Пьезоэлектрические трансформаторы. - М.: “Энергия”, 1975.-110 с..
2. Juhyun Yoo, Kwanghee Yoon, Songmo Hwang, Sungiae Suh, Jongsun Kim, Chungsik Yoo. Electrical characteristics of nigh power piezoelectric transformer for 28W fluorescent Lamp. Sensor and Actuators. A90. 2001.
3. Ерофеев А.А. и др. Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике / А.А.Ерофеев, Г.А.Данов, В.Н.Фролов. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
4. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. М.: “Энергия”, 1981.-210 с.
5. Пат. 439.992 США/ Розен К.А. – 29.06. 1954
6. Карташев И.А., Марченко Н. Б. Пьезоэлектрические трансформаторы тока. — Киев: Техника, 1978. — 176 с.
7. Джагупов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник. — СПб.: Политехника, 1994. — 608 с
8. Магнитные и диэлектрические приборы. Пер. с англ./ Под ред. Г.В.Катца. – М.: Энергия, 1964. – 47 с
9. Simon Lineykin. Piezoelectric transformers in power electronics. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the M.Sc degree, 2000, 146 p.
10. Климашин В.М., Никифоров В.Г. Новые области применения пьезотрансформаторов // Компоненты и технологии, №1 2006 г., стр.56–60.
11. Некрасов М.М., Лавриненко В.В., Плаховий Н.В., Хращевский В.А. Способ изготовления многослойных пьезотрансформаторов А.С. №264497 (СССР)
12. Alfredo Vázquez Carazo. 50 Years of Piezoelectric Transformers. Trends In The Technology. Department of R&D Engineering, Face Electronics, 2001, 14 p.

13. Грибовский П. О. Керамические твердые схемы. — М.: Энергия, 1971. – 215 с.
14. Лавриненко В.В. П'єзоелектричні пристрої як елементи електроніки твердого тіла. Автореферат дис. на соиск. учен. степені канд. техн. наук, 1967, 20с (КПИ).
15. Плужников В.М., Семенов В.С. Пьезокерамические твердые схемы. М., «Энергия», 1971, 168 с.
16. Глозман И. А. Пьезокерамика. — М.: Энергия, 1972. — 288 с.
17. Б. Яффе У. Кук Г. Яффе Пьезоэлектрическая керамика Издательство «Мир» Москва 1974
18. Пасынков Р.Н., Виноградов В.В. Стабилизированные пьезокерамические материалы. – Известия АН СССР, сер. физ., т. XXI, 1957, №3.
19. Фесенко Е. Г., Данцигер А. Я., Разумовская О. Н. Новые пьезокерамические материалы. Издательство Ростовского университета, 1983.160с.
20. Смажевская Е. Г., Фельдман Н. Б. Пьезоэлектрическая керамика. — М.: Сов. радио, 1971. — 200 с.
21. Берсукер И.В. Эффект Яна-Тельмана и вибронные взаимодействия в современной химии. – М.: Наука, 1987. -344 с.
- 22 Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций. - К.: Наукова думка, 1989. - Т.5: Электроупругость.
- 23 Пьезоэлектрические преобразователи / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ю.Ю. Бондаренко, Т.Ю. Кисиль, М.П. Мусиенко, С.В. Ротгэ, И.Б. Чудаева / Под ред. В.М. Шарапова. - Черкассы: ЧГТУ, 2004. -435 с.25. S. Hallaert, E. Sarraute, B. Le Pionfle. Numerical and Analytical Modeling of The Piezoelectric Transformer and Experimental Verification. LiMMS/CNRS, The University of Tokio. 2001.
24. Texas Instruments, Multy-topology piezoelectric transformer controller. – Режим доступу: [www.ti.com](http://www.ti.com). – 24.03.2018.
25. Паэранд Ю.Э. Исследование влияния технологических факторов на параметры составных пьезокерамических преобразователей для электромеха-

нических фильтров и разработка новых технологических процессов их изготовления: Дисс. канд. техн. наук.: 05.12.13. – М., НПО «Фонон», 1985. -165 с.

26. Справочник пьезокерамических материалов различных фирм. Режим доступа: [www.elpiezo.ru](http://www.elpiezo.ru) – 28.03.2018.