

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет Інформаційних технологій та електроніки
(повне найменування факультету)

Кафедра Електронних апаратів
(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 ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРАЛЕЛЬНОГО І ПОСЛІДОВНОГО
З'ЄДНАННЯ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРІВ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ ДЖЕРЕЛАХ
ЖИВЛЕННЯ

Виконав: студент групи Ел-21дм

Тарабановський Д.Т. _____
(прізвище, та ініціали) (підпис)

Керівник Паєранд Ю.Е. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Завідувач кафедри Паєранд Ю.Е. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Київ 2022

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет Інформаційних технологій та електронікиКафедра Електронних апаратівОсвітньо-кваліфікаційний рівень магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)Спеціальність 171 – Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ю.Е. Паеранд
“ ” 2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Тарабановському Дмитру Тимофійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження ефективності паралельного і послідовного з'єднання п'єзотрансформаторів в високовольтних джерелах живлення».

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “03” листопада 2022 року № 77/15.13-С

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15.11.2022

3. Вихідні дані до роботи Матеріали науково-дослідної практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
- 1) Аналітичний огляд.
- 2) Принципи роботи п'єзоелектричного трансформатора. Паралельне і послідовне включення
- 3) Чинники, що впливають на роботу п'єзоелектричного трансформатора
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
6. Дата видачі завдання 01.09.2022

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Актуальність теми і постановка завдань дослідження	01.08.22-10.08.22	
2	Аналіз розробок та досліджень	11.08.22-31.08.22	
3	Експериментальні дослідження вихідних характеристик п'єзоелектричного трансформатора	01.09.22-30.09.22	
4	Дослідження впливу температури й старіння на опір п'єзоелектричного трансформатора	01.10.22-31.10.22	
5	Оформлення пояснювальної записки	01.11.22-14.11.22	
6	Передача роботи на перевірку та рецензування	15.11.22 - 19.11.22	

Студент Тарабановський Д.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 87 с., 75 рисунків, 30 таблиць.

Об'єктом дослідження є одношарові і багатшарові п'єзоелектричні трансформатори напруги поперечно-подовжнього типу.

Мета роботи - розробка ефективних способів використання п'єзоелектричних трансформаторів напруги в високовольтних джерелах живлення, а також підвищення вихідної потужності схем з використанням п'єзотрансформаторів.

В процесі роботи проводилися експериментальні дослідження для визначення залежності вихідної напруги, а також поведінки резонансної частоти від навантаження п'єзотрансформатора. Методи збільшення вихідної потужності досліджувалися як за допомогою проведення фізичного експерименту, так і за допомогою систем автоматичного проектування.

В результаті дослідження було встановлено, що більш ефективне використання п'єзоелектричних трансформаторів можливе тільки на резонансній частоті другої моди коливань, а різні способи з'єднання п'єзотрансформаторів дозволяють досягти як більшої вихідної напруги (у разі їх послідовного з'єднання), так і більшого вихідного струму (при паралельному з'єднанні).

П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСФОРМАТОР, П'ЄЗОКЕРАМІКА, КОЕФІЦІЄНТ
ТРАНСФОРМАЦІЇ, РЕЗОНАНС, ВИСОКОВОЛЬТНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ,
ЧАСТОТА

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	8
1.1 Вступ	8
1.2 Основні типи та конструкції п'єзоелектричних трансформаторів	10
1.3 Принцип роботи п'єзоелектричного трансформатора	19
1.4 Застосування п'єзотрансформаторів	20
1.5 Висновки	24
РОЗДІЛ 2 ПРИНЦИПИ РОБОТИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. ПАРАЛЕЛЬНЕ І ПОСЛІДОВНЕ ВКЛЮЧЕННЯ	26
2.1 Експериментальні дослідження вихідних характеристик п'єзоелектричного трансформатора.	26
2.2 Моделювання п'єзотрансформатора за допомогою САПР.	37
2.3 Дослідження паралельного і послідовного включення п'єзотрансформаторів. ..	47
2.3.1 Загальні засади.	46
2.3.2 Моделювання послідовного включення двох п'єзоелектричних трансформаторів.	47
2.3.3 Моделювання паралельного включення двох п'єзоелектричних трансформаторів.	50
2.3.4 Експериментальна частина.	53
2.4 Висновки.	70
РОЗДІЛ 3 ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РОБОТУ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА	72
3.1 Вплив температури й старіння на опір ПТ.	73
3.2 Вплив механічних сил.	75
3.3 Вплив технологічного розкиду параметрів.	77
3.4 Можливість автоматичного забезпечення роботи ПТ в області резонансної частоти.	80
3.5 Висновки.	83
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	85

ВСТУП

Актуальність теми. На зорі мініатюризації сучасних пристроїв, перспективним напрямом є виготовлення високоякісних п'єзоелектричних трансформаторів, що дозволяє розробляти на їх основі електронні пристрої і схеми, що відрізняються своєю ефективністю і кращими масогабаритними показниками.

П'єзоелектричні трансформатори мають ряд істотних переваг в порівнянні з електромагнітними трансформаторами: хороша ізоляція і незаймистість, відсутність електромагнітних завад і нечутливість до електромагнітних полів, високий коефіцієнт трансформації, можливість роботи на високих частотах.

П'єзоелектричні трансформатори заслуговують на увагу інженерів, в першу чергу тим, що на їх основі можлива розробка малогабаритних вторинних джерел живлення (ВДЖ). Проте особливість роботи п'єзотрансформаторів визначає деяку складність при розробці електричних схем на їх основі, а невисока вихідна потужність обмежує використання п'єзотрансформаторів в різних областях електроніки.

Таким чином, поставлені завдання і запропоновані способи їх вирішення, є найбільш актуальними.

Мета і завдання роботи. Розробка ефективних способів використання п'єзоелектричних трансформаторів напруги в високовольтних джерелах живлення, а також підвищення вихідної потужності схем з використанням п'єзотрансформаторів. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- дослідження послідовного включення декількох п'єзотрансформаторів;
- дослідження паралельного включення декількох п'єзотрансформаторів;
- дослідження можливості автоматичного забезпечення роботи п'єзоелектричного трансформатора в області резонансної частоти.

Об'єктом дослідження є одношарові та багатошарові п'єзоелектричні трансформатори напруги поперечно-подовжнього типу ТП-Р1 і ТП-РМ.

Предметом дослідження є розробка способів забезпечення ефективної роботи п'єзоелектричних трансформаторів напруги і підвищення вихідної потужності при включенні декількох п'єзотрансформаторів.

Наукова цінність роботи полягає в наступному:

- розглянуті принципи роботи п'єзотрансформатора і їх особливості;
- представлені рекомендації по використанню п'єзотрансформаторів;
- запропонований спосіб збільшення здатності до навантаження, заснований на паралельному і послідовному включенні декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги, який дозволяє отримати велику вихідну потужність в схемах з використанням ПТ;
- запропонований спосіб автоматичного налаштування п'єзотрансформатора на частоту резонансу, який полягає в контролі вхідного струму або вихідної напруги, що забезпечує максимальне значення напруги на виході п'єзотрансформатора.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані способи дозволяють:

- розширити сферу застосування п'єзоелектричних трансформаторів за рахунок збільшення вихідної потужності при паралельному і послідовному включенні декількох ПТ;
- підвищити ефективність використання схем на базі п'єзотрансформаторів за рахунок автоматичної стабілізації вихідної напруги на максимальному значенні.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Вступ

Історія розвитку п'єзоелектрики налічує більше 120 років. У 1880 р. П'єр і Жак Кюрі виявили, що під впливом сили на поверхні деяких матеріалів виникають електричні заряди. Цей ефект згодом був названий прямим п'єзоелектом, електрика, викликана механічним тиском - п'єзоелектрикою, а матеріали, в яких відбувається це явище, - п'єзоелектричними (кварц, турмалін, сегнетова сіль та ін.) [1].

Практичне застосування п'єзоелектричного ефекту розпочалося з 1917 р., коли французький математик і фізик Поль Ланжевен запропонував використати ультразвуковий ехолокаційний прилад для виявлення підводних об'єктів [2]. Важливо відмітити зворотність п'єзоелекту : при деформації п'єзокристала на його поверхнях виникає різниця потенціалів (напруга), і навпаки, при прикладанні до протилежних граней електричної напруги (тобто при розміщенні кристала в електричне поле) відбувається зміна лінійних розмірів кристала, деформація.

Вперше конструкція п'єзотрансформатора була запатентована в 1956 році американським вченим Розеном [3]. П'єзоелектричні трансформатори - це п'єзоелементи з двома системами електродів - вхідною і вихідною. П'єзотрансформатор має ряд властивостей, які дають йому перевагу над електромагнітними трансформаторами. Одно з найголовніших - це масогабаритні показники. На відміну від електромагнітних трансформаторів п'єзотрансформатор має наступні переваги [4; 5]:

- висока гальванічна розв'язка (це пояснюється тим, що збудник механічно пов'язаний з генератором, отже гальванічний, а також і електричний зв'язок між входом і виходом відсутні);

- хороша ізоляція та незаймистість;

- відсутність електромагнітних завад та нечутливість до електромагнітних полів;
- високий коефіцієнт трансформації і ККД понад 95 % (в деяких випадках 99 %);
- можливість роботи на високих частотах.

Саме масогабаритні показники п'єзотрансформаторів дають можливість розробляти на їх основі малогабаритні вторинні джерела живлення(ВДЖ).

Вторинні джерела живлення зазвичай займають від 20-80% загального об'єму радіотехнічного пристрою. Широке застосування інтегральної гібридної технології різко зменшують вага і габарити радіотехнічних пристроїв, тоді як відносний об'єм та вага вторинних джерел електроживлення зросли. Підвищення необхідності, а також зменшення ваги, габариту та вартості виробів значною мірою залежить від правильного вибору і проектування вторинних джерел електроживлення. Одним із способів зменшення масогабаритних показників ВДЖ може бути зменшення розмірів електромагнітного трансформатора. Проте створення мініатюрного електромагнітного трансформатора пов'язане зі значними труднощами, оскільки при зменшенні габаритних розмірів в ньому різко зростають втрати, пов'язані з поверхневим ефектом, малим перерізом дротів та ефектом гістерезису в матеріалі сердечника. Крім того, при зменшенні розмірів збільшується щільність магнітного випромінювання, що вимагає додаткового екранування. Вирішення цієї проблеми — це використання п'єзоелектричного трансформатора, в якому здійснюється подвійне перетворення електромеханічної енергії при коефіцієнті трансформації, що дозволяє адаптувати його застосування до необхідних рівнів вихідної напруги.

Враховуючи стан ринку сучасної техніки і вимоги, які пред'являються до електронних компонентів, можна зробити висновок що ПТ є перспективним класом електронних компонентів. Тому в плані дослідження ПТ є великим інтересом.

Прагнення мініатюризації електронних приладів спричинило розробки в області подальшого зменшення ПТ і поліпшення їх електричних показників. Останніми роками розроблені принципово нові конструкції п'єзотрансформаторів — багат шарові. Конструкція багат шарових п'єзотрансформаторів складається з

тонких шарів (п'єзокераміка товщиною 100-200 мкм), що чергуються, і електродів (платина або платиново-паладієвий матеріал). Технологія виготовлення аналогічна стандартній технології виготовлення багат шарових конденсаторів. Ця конструкція дозволяє забезпечити високу щільність потужності п'єзотрансформатора і, відповідно, зменшити габарити в 3-5 разів у порівнянні з традиційним п'єзотрансформатором, а також дозволяє працювати на низькоомне навантаження з високим ККД.

Проте електронні схеми на базі багат шарових та одношарових ПТ розрізняються в силу відмінності їх характеристик. Тому багат шарові ПТ також представляють великий інтерес в плані їх дослідження.

Нині в зарубіжній та вітчизняній літературі недостатньо освітлені параметри й характеристики багат шарових ПТ, на відміну від одношарових.

1.2 Основні типи та конструкції п'єзоелектричних трансформаторів

У простому випадку п'єзоелектричний трансформатор (ПЕТ) є монолітною або складеною (клеєною) керамічною пластиною, що складається з двох секцій: вхідній - секції збудження та вихідній - генераторній секції. Вхідна секція ПЕТ підключається до джерела електричного сигналу, а вихідна до навантаження.

Конструкція ПЕТ зображена на рисунку 1.1.

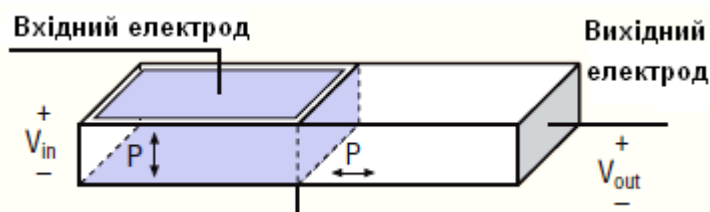


Рисунок 1.1 – Конструкція п'єзоелектричного трансформатора

Зовнішній вигляд п'єзоелектричних трансформаторів представлений на рисунку 1.2.

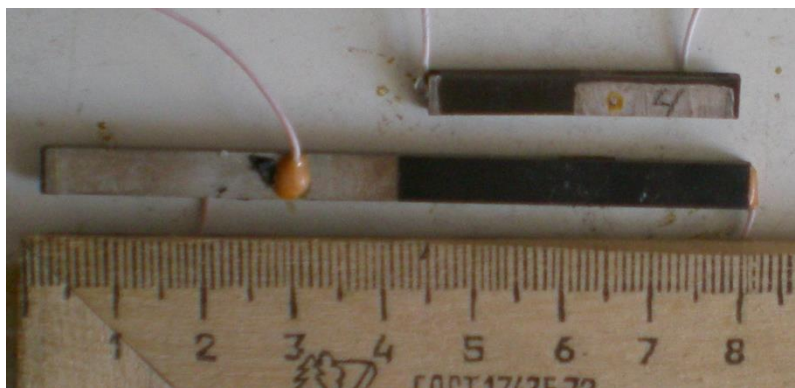


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд п'єзоелектричних трансформаторів

На частину зовнішніх поверхонь наносяться методом вжигання срібні електроди (товщина шару 6-12 мкм). Для набуття п'єзоелектричних властивостей пьезотрансформатор поляризується при його розміщенні в сильному електричному полі. За типом збудження об'ємних хвиль деформацій в ПТ їх умовно поділяють на коливання зрушення, коливання вигину, поперечні та подовжні (рисунок 1.3) [6].

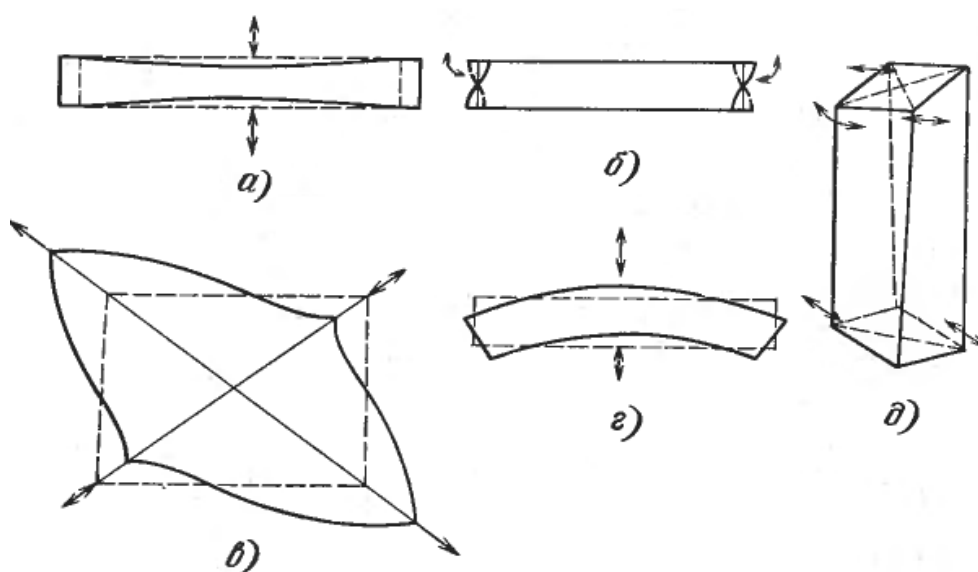


Рисунок 1.3 – Характер механічних коливань п'єзоелемента

Подовжні коливання (стискування-розтягування) (рисунок 1.3, а) відбуваються по довжині пластини. Частоту коливань в цьому випадку визначає довжина п'єзоелемента. Поперечні коливання це коливання зрушення по товщині (рисунок 1.3, б), тут частоту коливань визначає товщина елемента. Коливання зрушення по

контур - по грані в площині коливань (рисунок 1.3, в). В даному випадку частоту коливань визначає контурний розмір. Коливання вигину – відбувається вигин елементів в площині коливань по грані або товщині в різних площинах (рисунок 1.3, г). Коливання, що відбуваються в п'єзоелементі з чотирма електродами, це коливання кручення (рисунок 1.3, д). Вид коливань визначається зрізом, числом електродів та їх розташуванням.

Існує два способи електромеханічного перетворення енергії подовжніх хвиль : подовжній та поперечний. Поперечне або подовжнє перетворення енергії може здійснюватися як у збуднику так і в генераторі.

Якщо до п'єзoeлектричної пластини з електродами на протилежних сторонах прикласти електричну напругу, то на кінцях пластини виникнуть сили стискування й розширення. Сили, що виникають при цьому, породжують акустичну хвилю, яка зображена на рисунку 1.4. Ця хвиля поширюється в подовжньому напрямку і досягає протилежного кінця пластини. Потім вона відбивається від нього, не змінюючи фази, і спрямовується назад до лівого кінця пластини, відбивається від нього і т. д. до тих пір, поки за рахунок механічних та електричних втрат в пластині хвиля не затухне.

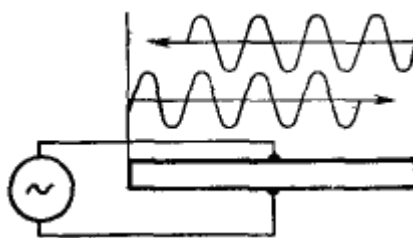


Рисунок 1.4 – Розподіл деформацій вздовж п'єзоелемента

При стискуванні (чи розширенні) зміщення часток відбувається в тому ж напрямі, в якому відбувається поширення хвилі. Такі хвилі називаються подовжніми на відміну від поперечних, у яких зміщення часток перпендикулярне напрямку їх поширення.

За способом перетворення енергії у збуднику і генераторі п'єзоелектричні трансформатори можна класифікувати як поперечно-поперечні, подовжньо-подовжні, поперечно-подовжні та подовжньо-поперечні.

Основні конструкції п'єзоелектричних трансформаторів показані на рисунку 1.5. Трансформатор з подовжньою поляризацією збудника й генератора (рисунок 1.5, а) називається трансформатором кільцевого типу, а з поперечно-подовжньою і поперечною поляризацією (рисунок 1.5, б й в) - трансформатором поперечного типу. Дисковий трансформатор (рисунок 1.5, г) також є трансформатором поперечного типу, але має деякі особливості роботи, тому дискові трансформатори виділяють в окрему групу.

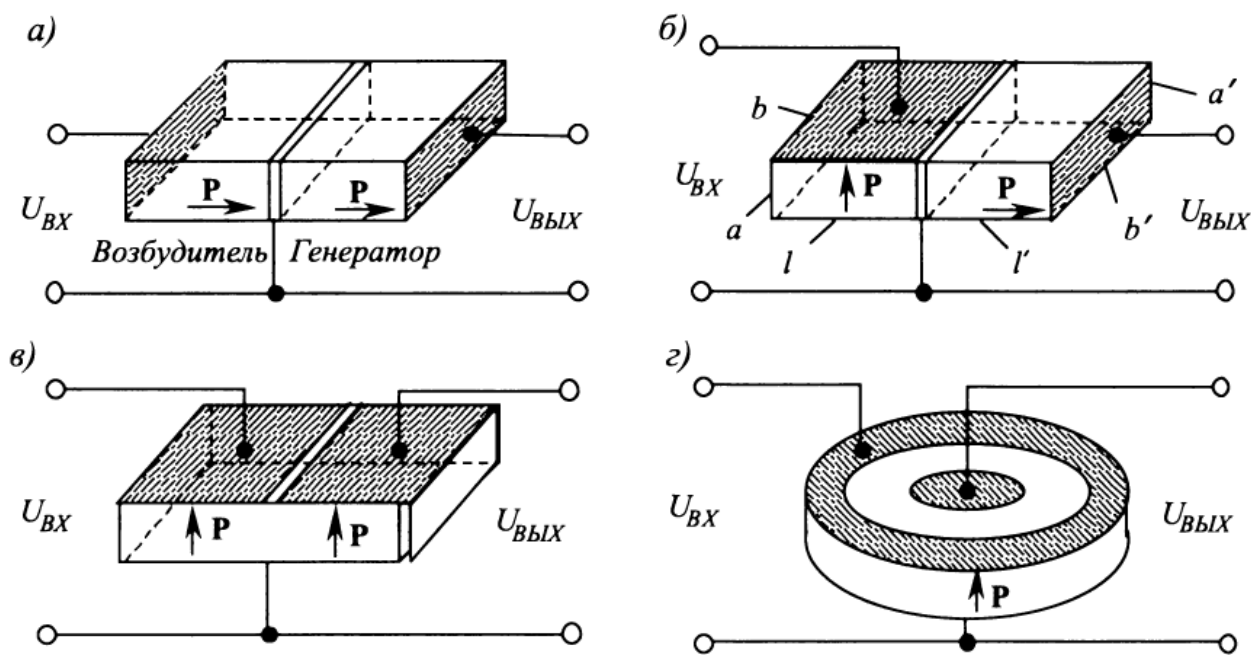


Рисунок 1.5 – Основні конструкції п'єзоелектричних трансформаторів

Подовжньо-подовжні та поперечно-поперечні трансформатори є симетричними. Їх коефіцієнт трансформації не залежить від геометричних розмірів і досягає декількох десятків і навіть сотень одиниць [7].

Поперечно-подовжній трансформатор є несиметричним, і його коефіцієнт трансформації залежить від співвідношення геометричних розмірів. Така конструкція трансформатора представляє найбільший практичний інтерес. Коефіцієнт

трансформації поперечно-подовжнього трансформатора може досягати декількох тисяч [7].

Коефіцієнт трансформації дискового трансформатора вищий, ніж у поперечного. При збудженні на радіальній моді коливань потік енергії через циліндричну поверхню залишається 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. Зменшення товщини трансформатора призводить до збільшення коефіцієнта трансформації. Вхідний та вихідний імпеданс визначається головним чином ємностями систем електродів [7].

Вперше конструкція поперечно-подовжнього типу була запропонована Розеном. Тому її часто називають також конструкцією Розена.

П'єзоелектричні трансформатори з генератором подовжнього типу називають п'єзоелектричними трансформаторами напруги (ПТН) [8]. Максимальна напруга на виході генератора ПТ визначається відстанню між електродами генератора та напругою, яку можна отримати з одиниці довжини п'єзоелектричного матеріалу. Сучасні п'єзоелектричні матеріали на основі твердих розчинів цирконату-титанату свинцю системи ЦТС дозволяють отримувати 50 - 300 В напругу з кожного міліметра довжини генератора [4]. Таким чином, для п'єзоелектричного матеріалу з питомою напругою 100 В/мм при довжині генератора 10 мм напруга на його обкладаннях дорівнюватиме 1000 В, а для генератора завдовжки 100 мм - 10000 В. Тому в якості високовольтних ПТН використовує конструкції з генераторами подовжнього типу у яких відстань між електродами максимально, а отже, максимальна напруга на виході трансформатора.

Крім того, для ПТН з генератором подовжнього типу характерні високі значення вихідних опорів, які для більшості конструкцій перевищують сотні кілоом. Останнім часом створені трансформатори з низьким коефіцієнтом трансформації по напрузі, але працюючі з великими струмами, що досягають декількох ампер [4].

Існують вузькосмужні й широкосмужні п'єзоелектричні трансформатори. Робочі частоти вузькосмужних трансформаторів вибираються в околиці однієї з частот механічного резонансу, т. б. у тій області частот, де коефіцієнт трансформації досягає максимальної величини. Конструкції ПТ визначаються умовами їх застосування. ПТ можуть бути виконані у вигляді пластини, стержня, циліндра або диска.

Прикладом ПТ у вигляді пластини є конструкція, зображена на рисунку 1.1. ПТ у вигляді стержня зображений на рисунку 1.6, ПТ є стержнем, подовжньо-подовжнього типу, з п'єзокерамики з нанесеними кільцевими електродами і з подовжньою поляризацією міжелектродних областей. При збудженні подовжніх коливань в стержні напрям поширення пружних хвиль та напрямку поляризації співпадають. Коефіцієнт трансформації такої конструкції значно нижчий, ніж у ПТ поперечно-подовжнього типу.

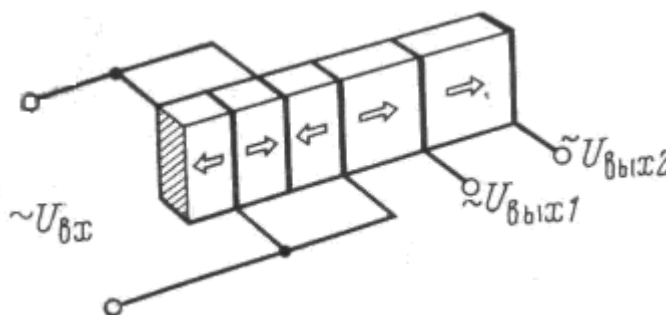


Рисунок 1.6 – ПТ з п'єзоелемента у вигляді стержня

ПТ з п'єзоелементом у вигляді циліндра є найбільш оптимальними для перетворення підвищеної потужності, що відрізняються високою міцністю при роботі в сильних динамічних полях і моночастотністю амплітудно-частотних характеристик (АЧХ). В них використовуються радіальні коливання циліндра. Трансформатори напруги з циліндричним або дисковим п'єзоелементами можна віднести до поперечно-подовжнього типу (дві поляризовані аксіальні генераторні секції із загальним кільцевим вихідним електродом).

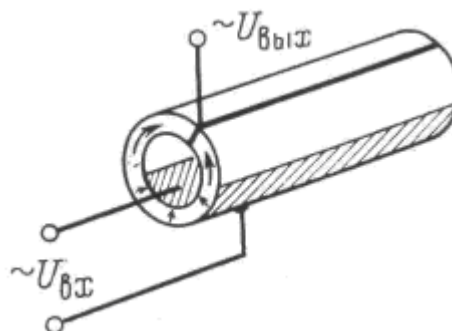


Рисунок 1.7 – ПТ з п'єзоелемента у вигляді циліндра

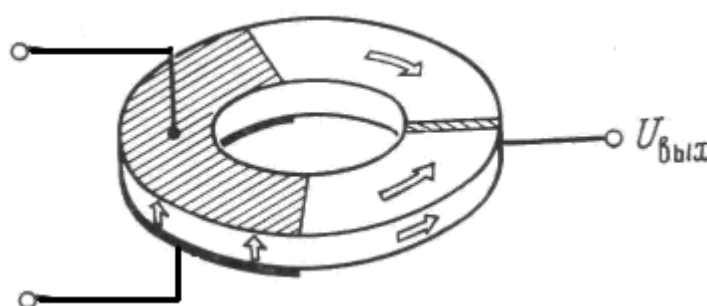


Рисунок 1.8 – Трансформатор напруги з дисковим п'єзоелементом

Недоліком ПТ напруги є невелика вихідна потужність. Отже, є цікавою ідея паралельного з'єднання декількох перетворювачів. На рисунку 1.9 представлений один з варіантів такого з'єднання. Ця конструкція ПТ дозволяє отримати потужність більше 20Вт, при розмірах зразка 7*8*19 мм [9].

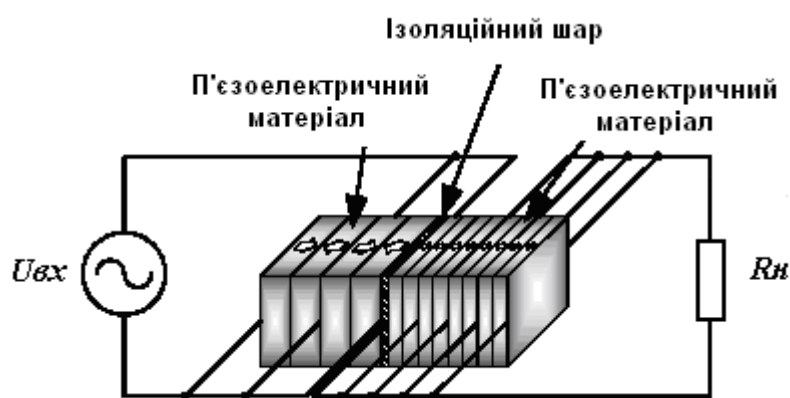


Рисунок 1.9 – З'єднання декількох перетворювачів для підвищення потужності пристрою

Останніми роками розроблені принципово нові конструкції п'єзотрансформаторів — багатошарові. Конструкція багатошарових п'єзотрансформаторів складається з тонких шарів (п'єзокераміка товщиною 100-200 мкм), що чергуються, і електродів (платина або платиново-паладієвий матеріал). Ця конструкція дозволяє забезпечити високу щільність потужності п'єзотрансформатора (до 40-50 Вт/см²), і відповідно зменшити габарити в 3-5 разів у порівнянні з традиційним одношаровим п'єзотрансформатором, а також дозволяє працювати на низькоомне навантаження з високим ККД [10]. В основному багатошаровим робиться збудник, конструкція багатошарового ПТ представлена на рисунку 1.10.

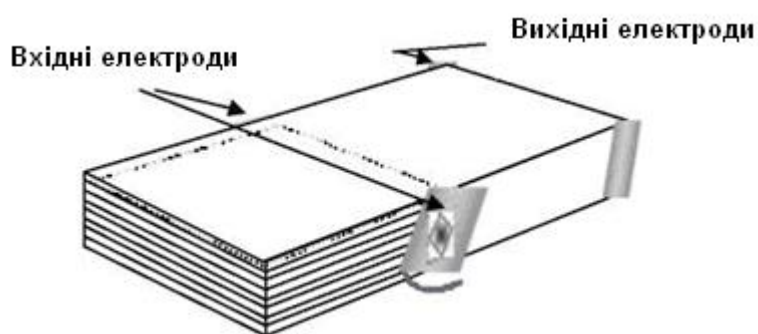




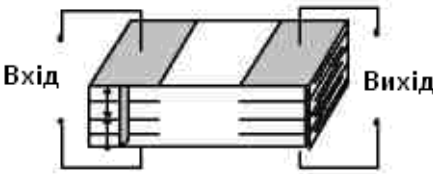
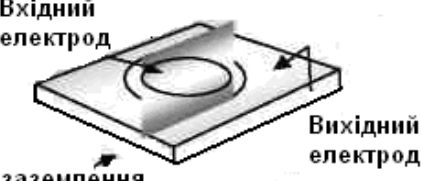

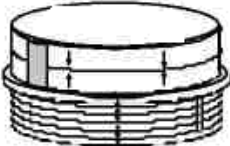
Рисунок 1.10 – Конструкція багатошарового п'єзотрансформатора

Багатошарові ПТ доцільно використовувати для збільшення потужності $P_{\text{вих}}$ та забезпечення нормального теплового режиму. У таблиці 1.1 представлені різні типи багатошарових ПТ [11].

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що вибір виду конструкції ПТ визначається в основному вимогами до його вхідних і вихідних електричних параметрів, а також до інших характеристик, таким як, стабільність параметрів, міцність, діапазон частот, температурна стабільність, вартість і так далі.

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

Таблиця 1.1 – Різні конструкції потужних п'єзоелектричних трансформаторів

Конструкція	Типи коливань	Резонансні частоти	Виробник
	по товщині	1 МГц	Японія
	подовжні	50-150 кГц	Японія
	подовжні	50-150 кГц	Японія
	контурні	50-150 кГц	Корея
	по товщині	400 кГц	Європа
	радіальні	50-250 кГц	США

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

1.3 Принцип роботи п'єзоелектричного трансформатора

Найбільш сильні п'єзоелектричні властивості мають п'єзокерамічні матеріали, які до того ж мають цілий ряд інших важливих переваг перед монокристаллами.

ПТ є монолітними твердотілими конструкціями, виконаними саме з п'єзокераміки. Для набуття п'єзоелектричних властивостей п'єзотрансформатор поляризується при його розміщенні в сильному електричному полі.

П'єзоелектрична кераміка за фізичними властивостями це полікристалічний сегнетоелектрик, що є хімічною сполукою або твердим розчином (порошок) зерен (кристалітів). По хімічному складу це складний оксид, що включає іони двовалентного свинцю або барію, а також іони чотиривалентного титану або цирконію. Шляхом зміни основного співвідношення початкових матеріалів і введення добавок синтезують різні склади п'єзокераміки, що мають певні електрофізичні та п'єзоелектричні характеристики. Найбільше поширення отримала група п'єзокерамічних матеріалів типу ЦТС (цирконату-титанату свинцю) [12].

Використання прямого та зворотнього п'єзоефекту дозволяє реалізувати таку важливу функцію електротехнічних пристроїв, як перетворення електричного сигналу одного рівня в електричний сигнал іншого, більш високого або низького рівня. При цьому трапляється нагода гальванічно розв'язати вхідні і вихідні ланцюги. Слід зазначити, що частотна характеристика трансформатора має яскраво виражені виборчі властивості і значний коефіцієнт трансформації вдається отримати тільки в резонансному режимі роботи [14].

По аналогії з електромагнітними трансформаторами за допомогою електродів формуються дві секції - вхідна та вихідна. Принцип дії заснований на подвійному перетворенні енергії : у вхідній секції (секції збудження) електрична енергія перетвориться в механічну, а у вихідній секції механічна енергія перетвориться в електричну [10].

В збуднику змінний електричний сигнал за рахунок зворотнього п'єзоефекту перетвориться в енергію акустичних хвиль, які, зароджуючись на межах електродів, поширюються по всьому об'єму трансформатора. На частоті, рівній одній з

резонансних механічних частот трансформатора, утворюється стояча хвиля з максимальною амплітудою коливань. У генераторі п'єзоелектричного трансформатора механічна напруга за рахунок прямого п'єзоефекту перетвориться в електричний сигнал [7]. Оскільки механічна напруга в стоячій хвилі максимальна на частотах резонансу, то і коефіцієнт трансформації має максимальне значення на резонансних частотах.

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

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

Вхідна напруга $U_{\text{вх}}$, що створює поле $E_{\text{вх}}$, за рахунок зворотнього п'єзоефекту, викликає деформацію S діелектрика і відповідну їй механічну напругу T . Хвиля деформації та механічної напруги через пружні зв'язки поступає в генераторну секцію, де вона за рахунок прямого п'єзоефекту викликає зміну поляризації P або індукції D діелектрика. (Як правило, генераторна секція розташовується в місці максимуму механічної напруги.) Це у свою чергу через зміну заряду на вихідному електроді $\Delta q = \Delta D A$ призводить до зміни вихідної напруги $\Delta U = \Delta q / C_{\text{вих}}$, $C_{\text{вих}}$ - вихідна ємність генераторної секції; A - площа вихідного електроду [13].

Як електричний багатополісник, п'єзоелектричний трансформатор заміщається порівняно складною схемою, тому він, швидше за все, може бути віднесений до функціональних елементів (твердій схемі), ніж до простіших електричних елементів - трансформаторів, конденсаторів, індуктивностей та ін. [4].

1.4 Застосування п'єзотрансформаторів

Активне використання п'єзокераміки в різних областях почалося в 60-70 роках ХХ століття. Досить добре були вивчені й використані властивості п'єзокерамічних датчиків та п'єзокерамічних перетворювачів.

Нині п'єзокераміка широко використовується:

- в високовольтних джерелах живлення, приладах нічного бачення, тепловізійних приладах й підсвічуванні дисплеїв ноутбука;

- в генераторах озону малої потужності та іонізаторах повітря;
- в медичних терапевтичних пристроях;
- для запалення неонових ламп та ламп з холодним катодом.

Особлива увага нині приділяється п'єзокерамічним трансформаторам й актюаторам. Хоча справжнє споживання п'єзотрансформаторів не так велике, проте потенціал їх застосування в майбутньому величезний. Одним з перспективних напрямів є їх використання в побутових та виробничих газонаповнених освітлювальних приладах в якості резонансних DC - AC конверторів. В основу перспективних освітлювальних приладів вже закладені принципи, що дозволяють економити до 80 % електроенергії в порівнянні з нині використовуваними приладами. Тому єдиний параметр, якому повинні відповідати перспективні конвертори, являються їх мінімальні геометричні розміри. Вивчення ринку підтверджує, що розробників освітлювальної техніки цікавлять не стільки порівняльні характеристики по напрузі або по споживаній потужності конверторів, скільки розміри, що дозволяють встановлювати їх в цоколі лампи. Останні дослідження показали доцільність використання багат шарових п'єзокерамічних трансформаторів в новій освітлювальній техніці [10]. Були розроблені прототипи таких конверторів, що задовольняють практично усім вимогам, окрім ціни. Тому виробники п'єзокераміки активно працюють над технологією, яка дозволила б добитися зниження їх собівартості.

Іншим перспективним напрямом використання п'єзотрансформаторів є їх застосування в силових пристроях. На ринку з'явилися сучасні пристрої, які використовують не традиційні одношарові (Rosen Type) п'єзотрансформатори, а багат шарові трансформатори. Прикладами цього можуть служити дисплеї зворотнього свічення на рідких кристалах (The liquid crystal display back light) та системи управління холодним катодом флуоресцентного освітлення (Driving cold cathode fluorescent lightning) [14]. В якості переваг багат шарових п'єзотрансформаторів в порівнянні з традиційними можна відмітити їх малий розмір (особливо товщина) та менше споживання енергії. Проте для сучасних багат шарових

трансформаторів, які з'явилися на ринку, визначальними чинниками як і раніше є ціна та розміри, над зниженням яких активно працюють виробники.

Існує велика вірогідність використання п'єзотрансформаторів в перспективних телевізійних та комп'ютерних дисплеях. Вже відпрацьовані прототипи таких дисплеїв, які дістали назву ПЕД — Польові Емісійні Дисплеї (FED — Field Emission Display). Це плоскі панельні дисплеї, що мають більш високу роздільну здатність і чіткість зображення в порівнянні з сучасними. Проте вже зараз розробляється нове покоління екранів з немерехтливим зображенням (Flicker Free Image Screen), для живлення яких також передбачається використання багатошарових п'єзокерамічних трансформаторів. Ринок телевізійної та комп'ютерної техніки вражає своїми новинками і примушує виробників п'єзокерамічних елементів інтенсифікувати дослідження й розробки в цій області. На сьогодні існує ряд компаній, що пропонують різні моделі п'єзоінверторів, і визнаним лідером цієї технології є компанія Zirpy Technology [15].

На рисунку 1.11 показані зовнішній вигляд та габаритне креслення п'єзоінвертора Zirpy (модель 400-8888-048), призначеного для живлення однієї люмінесцентної лампи з холодним катодом ЛЛХК.

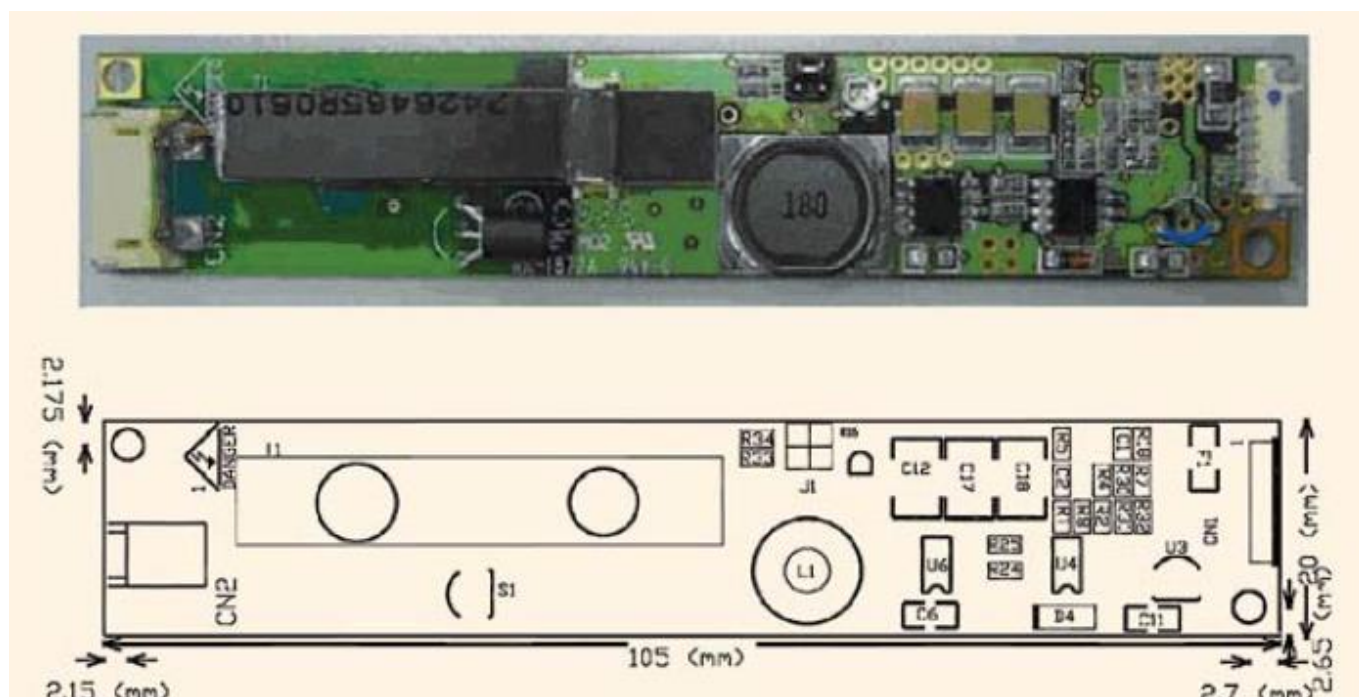


Рисунок 1.11 – П'єзоінвертор моделі 400-8888-048 для живлення однієї ЛЛХК

П'єзоперетворювачі практично не роблять електромагнітного випромінювання (ЕМВ), оскільки виконані з непровідної кераміки. Їх випромінювання на 12...18 дБ нижче загальнопромислового фону ЕМВ. Відомо, що створення мініатюрного обмотувального трансформатора для класичних перетворювачів зв'язане зі значними труднощами. Так, при зменшенні габаритів різко збільшуються втрати, обумовлені поверхневим ефектом, малим перерізом дротів та ефектом гістерезису в матеріалі сердечника; підвищена щільність магнітного випромінювання вимагає додаткового екранування. Використання п'єзоелектричного трансформатора позбавлене цих недоліків і дозволяє створювати мініатюрні конструкції.

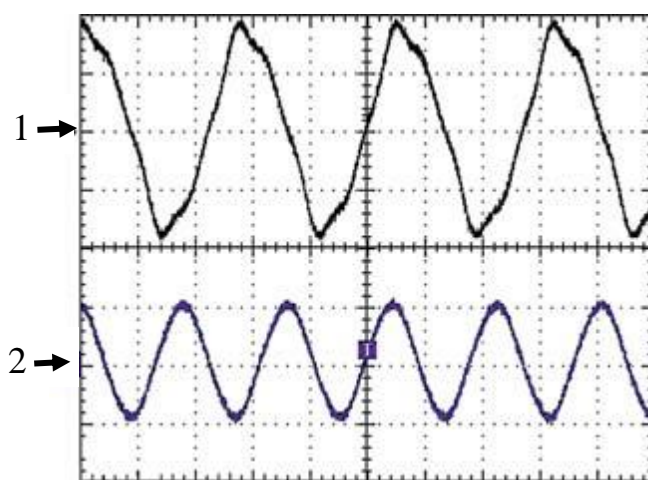


Рисунок 1.12 – Осцилограми вихідної напруги:
традиційної (1) та п'єзоінвертора (2)

При живленні ЛЛХК однаковим струмом верхня осцилограма (рисунок 1.12) є напругою на лампі від традиційного інвертора, нижня – при живленні від п'єзоінвертора Zipru. Видно, що вихідний сигнал п'єзоінвертора Zipru – правильна синусоїда; у традиційного інвертора - сигнал трикутної форми.

Конструкція п'єзоелектричного трансформатора через високий внутрішній імпеданс не придатна для передачі великих потужностей на вихідне навантаження, але забезпечує високий коефіцієнт трансформації від 100 до 10000 при вихідній потужності не вище 5-10 Вт. Джерела живлення побудовані на базі п'єзотрансформатора з вихідною потужністю 5-10 Вт можуть використовуватися для

широкого кола додатків, включаючи системи телекомунікацій, промислову автоматику, вимірювальну техніку, прилади управління, системи безпеки і тому подібне.

Нижче будуть розглянуті методи підвищення вихідної потужності високовольтних джерел живлення на базі п'єзотрансформаторів як способи їх різноманітного з'єднання. Варто відмітити, що підвищення вихідної потужності дозволить розширити діапазон застосування високовольтних джерел живлення на базі ПТ в різних областях.

1.5 Висновки

П'єзоелектрика як наука налічує багаторічну історію від дня свого існування, а вже перша конструкція п'єзоелектричного трансформатора була запатентована американським вченим Розеном більше 50 років тому. Така конструкція являє собою одношаровий п'єзотрансформатор поперечно-подовжнього типу, яка надалі отримала найбільше застосування. Принцип роботи такого трансформатора заснований на використанні п'єзоелектричного ефекту : зворотнього в секції збудника та прямого в генераторній секції ПТ.

З моменту винаходу п'єзоелектричного трансформатора, було запропоновано декілька конструкцій, які відрізнялися один від одного за способом перетворення енергії в збуднику й генераторі п'єзоелектричного трансформатора, а практичний інтерес представляє саме поперечно-подовжня конструкція ПТ, оскільки коефіцієнт трансформації залежить від співвідношення геометричних розмірів і може досягати декількох тисяч.

Проте, на відміну від звичайного одношарового п'єзоелектричного трансформатора, найбільш ефективною є конструкція багатшарового п'єзотрансформатора. Коефіцієнт трансформації такого ПТ перевищує коефіцієнт трансформації одношарового п'єзотрансформатора у декілька разів. Варто також

відмітити, що геометричні розміри багатошарових п'єзотрансформаторів значно менше у порівнянні з одношаровими.

П'єзоелектричні трансформатори мають ряд переваг (високий коефіцієнт трансформації і ККД, відсутність електромагнітних завад та нечутливість до електромагнітних полів, можливість роботи на високих частотах) які дозволили їм не лише конкурувати з електромагнітними трансформаторами, але й упевнено закріпити свої позиції на сучасному ринку електроніки.

Нині п'єзоелектричні трансформатори широко використовуються у високовольтних джерелах живлення, приладах нічного бачення, в генераторах озону малої потужності та іонізаторах повітря, в медичних терапевтичних пристроях, для запалення неонових ламп і ламп з холодним катодом. А масогабаритні показники дозволяють розробляти вторинні джерела живлення на базі п'єзотрансформаторів.

Проте конструкція п'єзоелектричного трансформатора через високий внутрішній імпеданс не придатна для передачі великих потужностей на вихідне навантаження. Саме цей показник є головним недоліком на сьогодні.

РОЗДІЛ 2

ПРИНЦИПИ РОБОТИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. ПАРАЛЕЛЬНЕ І ПОСЛІДОВНЕ ВКЛЮЧЕННЯ

2.1 Експериментальні дослідження вихідних характеристик п'єзоелектричного трансформатора.

Для дослідження характеристик ПТ був використаний лабораторний стенд, схема якого приведена на рисунку 2.1.

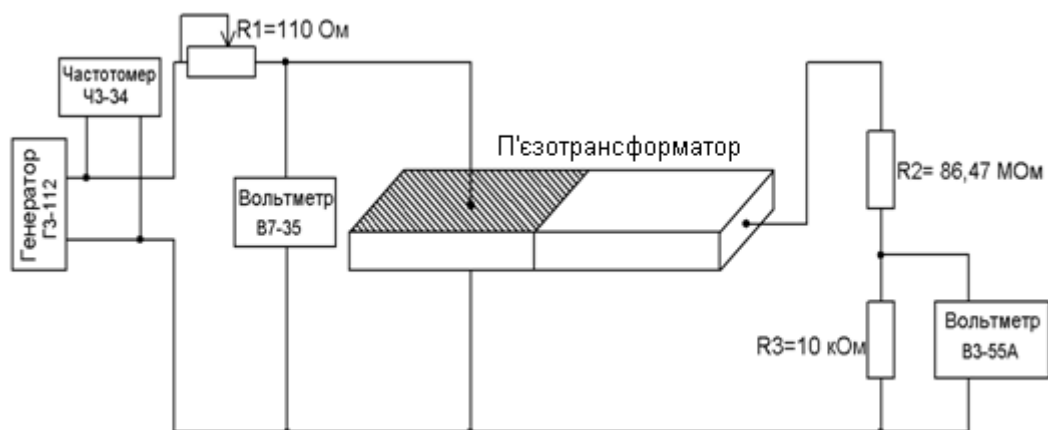


Рисунок 2.1 – Схема включення для дослідження ПТ

За допомогою низькочастотного генератора сигналів ГЗ-112 задавалася вхідна частота п'єзотрансформатора. Контроль частоти здійснювався частотоміром ЧЗ-34. Напруга на вході вимірювалася вольтметром В7-35. За допомогою дільника у вихідній секції ($R_3 = 10 \text{ кОм}$ і $R_2 = 86,47 \text{ МОм}$) вимірювалася напруга у вихідному колі п'єзотрансформатора. Виміри з вихідного дільника напруги проводилися за допомогою вольтметра ВЗ-55А. Як навантаження використовувався опір в $86,47 \text{ МОм}$. В ході досліджень були отримані залежності вихідної напруги від частоти, побудовані залежності вихідної напруги від вхідної, а також від параметрів навантаження, визначений коефіцієнт трансформації. Результати проведених вимірів занесені в таблиці 2.1 – 2.6.

За отриманими даними були побудовані графіки залежностей.

Таблиця 2.1 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=10$ МОм

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{МОм}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	5	6
3	10	10	11
3	10	15	16
3	10	16,9	16,3
3	10	17,7	15,5
3	10	18,7	12,2
3	10	19	11,0
3	10	19,2	9,5
3	10	19,4	7
3	10	19,6	4,2
3	10	19,8	7,5
3	10	19,9	13,5
3	10	20	22
3	10	20,2	40,5
3	10	20,3	65
3	10	20,4	108,1
3	10	20,5	183,1
3	10	20,6	165,1
3	10	20,7	118,6
3	10	20,8	90,1
3	10	20,9	75,1

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{МОм}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	21	61,5
3	10	25	36
3	10	29,4	39
3	10	30,9	42
3	10	34,7	49,5
3	10	40	97,6
3	10	40,1	97,5
3	10	40,2	105,1
3	10	40,3	112,6
3	10	40,4	118,6
3	10	40,5	126,1
3	10	40,7	148,6
3	10	40,8	165,1
3	10	40,9	187,1
3	10	41	255,2
3	10	41,5	420,4
3	10	45	30
3	10	50	40
3	10	61	45
3	10	62	90,1
3	10	62,5	77,1

Таблиця 2.2 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=20$ МОм

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{МОм}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	20	5	13
3	20	10	24
3	20	15	32
3	20	16,9	32
3	20	17,7	30
3	20	18,7	22
3	20	19	18
3	20	19,2	13
3	20	19,4	8
3	20	19,6	15
3	20	19,8	45
3	20	19,9	79,1
3	20	20	123,1
3	20	20,2	210,1
3	20	20,3	318,2
3	20	20,4	276,1
3	20	20,5	207,1
3	20	20,6	165,1
3	20	20,7	141,1
3	20	20,8	123,1
3	20	20,9	114,1

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{МОм}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	20	21	102,1
3	20	25	69
3	20	29,4	78
3	20	30,9	84
3	20	34,7	90
3	20	40	264,1
3	20	40,1	288,1
3	20	40,2	321,2
3	20	40,3	363,2
3	20	40,4	423,2
3	20	40,5	510,3
3	20	40,6	720,4
3	20	40,7	960,5
3	20	40,8	1000
3	20	40,9	620,3
3	20	41	310,2
3	20	41,5	100,1
3	20	45	60
3	20	50	80
3	20	61	80
3	20	62	170,1
3	20	62,5	140,1

Таблиця 2.3 – Залежність $U_{вих}$ від $f_{вх}$ при $R_H=30$ МОм

$U_{вх}, В$	$R_H,$ МОм	$f_{вх},$ кГц	$U_{вих}, В$
3	30	5	16,5
3	30	10	33
3	30	15	46,5
3	30	16,9	46,5
3	30	17,7	42
3	30	18,7	28,5
3	30	19	21
3	30	19,2	13,5
3	30	19,4	16,5
3	30	19,6	43,5
3	30	19,8	112,5
3	30	19,9	183,1
3	30	20	267,1
3	30	20,2	414,1
3	30	20,3	513,2
3	30	20,4	405,1
3	30	20,5	315,1
3	30	20,6	256,6
3	30	20,7	220,6
3	30	20,8	198,1
3	30	20,9	180,1

$U_{вх}, В$	$R_H,$ МОм	$f_{вх},$ кГц	$U_{вих}, В$
3	30	21	162,1
3	30	25	108
3	30	29,4	121,5
3	30	30,9	130,5
3	30	34,7	153,1
3	30	40	490,7
3	30	40,1	540,2
3	30	40,2	612,2
3	30	40,3	720,2
3	30	40,4	877,8
3	30	40,5	1185
3	30	40,6	1696
3	30	40,7	2281
3	30	40,8	1801
3	30	40,9	1125
3	30	41	555,2
3	30	41,5	150,1
3	30	45	90
3	30	50	120
3	30	61	120
3	30	62	255,1
3	30	62,5	210,1

Таблиця 2.4 – Залежність $U_{вих}$ від $f_{вх}$ при $R_H=40$ МОм

$U_{вх}, В$	$R_H,$ МОм	$f_{вх},$ кГц	$U_{вих}, В$
3	40	5	22
3	40	10	44
3	40	15	62
3	40	16,9	60
3	40	17,7	54
3	40	18,7	36
3	40	19	26
3	40	19,2	20
3	40	19,4	28
3	40	19,6	66
3	40	19,8	166
3	40	19,9	272,1
3	40	20	380,1
3	40	20,2	582,2
3	40	20,3	612,2
3	40	20,4	534,1
3	40	20,5	414,1
3	40	20,6	330,1
3	40	20,7	294,1
3	40	20,8	258,1
3	40	20,9	234,1

$U_{вх}, В$	$R_H,$ МОм	$f_{вх},$ кГц	$U_{вих}, В$
3	40	21	210,1
3	40	25	144
3	40	29,4	162
3	40	30,9	174
3	40	34,7	210,1
3	40	40	702,2
3	40	40,1	780,2
3	40	40,2	888,2
3	40	40,3	1092
3	40	40,4	1460
3	40	40,5	1880
3	40	40,6	2701
3	40	40,7	3101
3	40	40,8	2041
3	40	40,9	1320
3	40	41	680,2
3	40	41,5	220,1
3	40	45	120
3	40	50	180,1
3	40	61	160
3	40	62	360,1
3	40	62,5	300,1

Таблиця 2.5 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=50$ МОм

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{МОм}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	50	5	27,5
3	50	10	57,5
3	50	15	77,5
3	50	16,9	75
3	50	17,7	65
3	50	18,7	42,5
3	50	19	32,5
3	50	19,2	30
3	50	19,4	50
3	50	19,6	107,5
3	50	19,8	250,1
3	50	19,9	397,6
3	50	20	502,6
3	50	20,2	810,1
3	50	20,3	810,2
3	50	20,4	682,6
3	50	20,5	540,1
3	50	20,6	435,1
3	50	20,7	382,6
3	50	20,8	337,6
3	50	20,9	315,1

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{МОм}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	50	21	277,6
3	50	25	187,5
3	50	29,4	210
3	50	30,9	225
3	50	34,7	270,1
3	50	40	975,2
3	50	40,1	1095
3	50	40,2	1260
3	50	40,3	1700
3	50	40,4	2075
3	50	40,5	2776
3	50	40,6	4001
3	50	40,7	3651
3	50	40,8	2300
3	50	40,9	1500
3	50	41	800,2
3	50	41,5	250,1
3	50	45	150
3	50	50	200
3	50	61	200
3	50	62	450,1
3	50	62,5	375,1

Таблиця 2.6 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=86,47$ МОм

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{МОм}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	86,47	5	47,6
3	86,47	10	95,1
3	86,47	15	125,4
3	86,47	16,9	116,7
3	86,47	17,7	99,5
3	86,47	18,7	60,5
3	86,47	19	73,5
3	86,47	19,2	108,1
3	86,47	19,4	181,6
3	86,47	19,6	332,9
3	86,47	19,8	657,3
3	86,47	19,9	908
3	86,47	20	1193
3	86,47	20,2	1738
3	86,47	20,3	1764
3	86,47	20,4	1505
3	86,47	20,5	1180
3	86,47	20,6	946,9
3	86,47	20,7	817,2
3	86,47	20,8	713,5
3	86,47	20,9	648,6

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{МОм}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	86,47	21	570,8
3	86,47	25	337,3
3	86,47	29,4	376,2
3	86,47	30,9	402,1
3	86,47	34,7	505,9
3	86,47	40	2037
3	86,47	40,1	2283
3	86,47	40,2	2854
3	86,47	40,3	3502
3	86,47	40,4	4367
3	86,47	40,5	5708
3	86,47	40,6	7956
3	86,47	40,7	7783
3	86,47	40,8	5319
3	86,47	40,9	3632
3	86,47	41	2032
3	86,47	41,5	778,3
3	86,47	45	172,9
3	86,47	50	345,9
3	86,47	61	259,4
3	86,47	62	864,8
3	86,47	62,5	691,8

Таблиця 2.7 – Залежність вихідної напруги від вхідної

$f_{вх}, \text{кГц}$	$R_{н}, \text{МОм}$	$U_{вх}, \text{В}$	$U_{вих}, \text{В}$
20,3	86,47	0,9	605,4
20,3	86,47	1,05	648,6
20,3	86,47	1,2	735,1
20,3	86,47	1,35	864,8
20,3	86,47	1,5	951,3
20,3	86,47	1,65	1038
20,3	86,47	1,8	1124
20,3	86,47	1,95	1167
20,3	86,47	2,1	1254
20,3	86,47	2,25	1340
20,3	86,47	2,4	1384
20,3	86,47	2,55	1470
20,3	86,47	2,7	1600
20,3	86,47	2,85	1686
20,3	86,47	3	1764

На рисунках 2.2 – 2.6 показана залежність вихідної напруги від частоти.

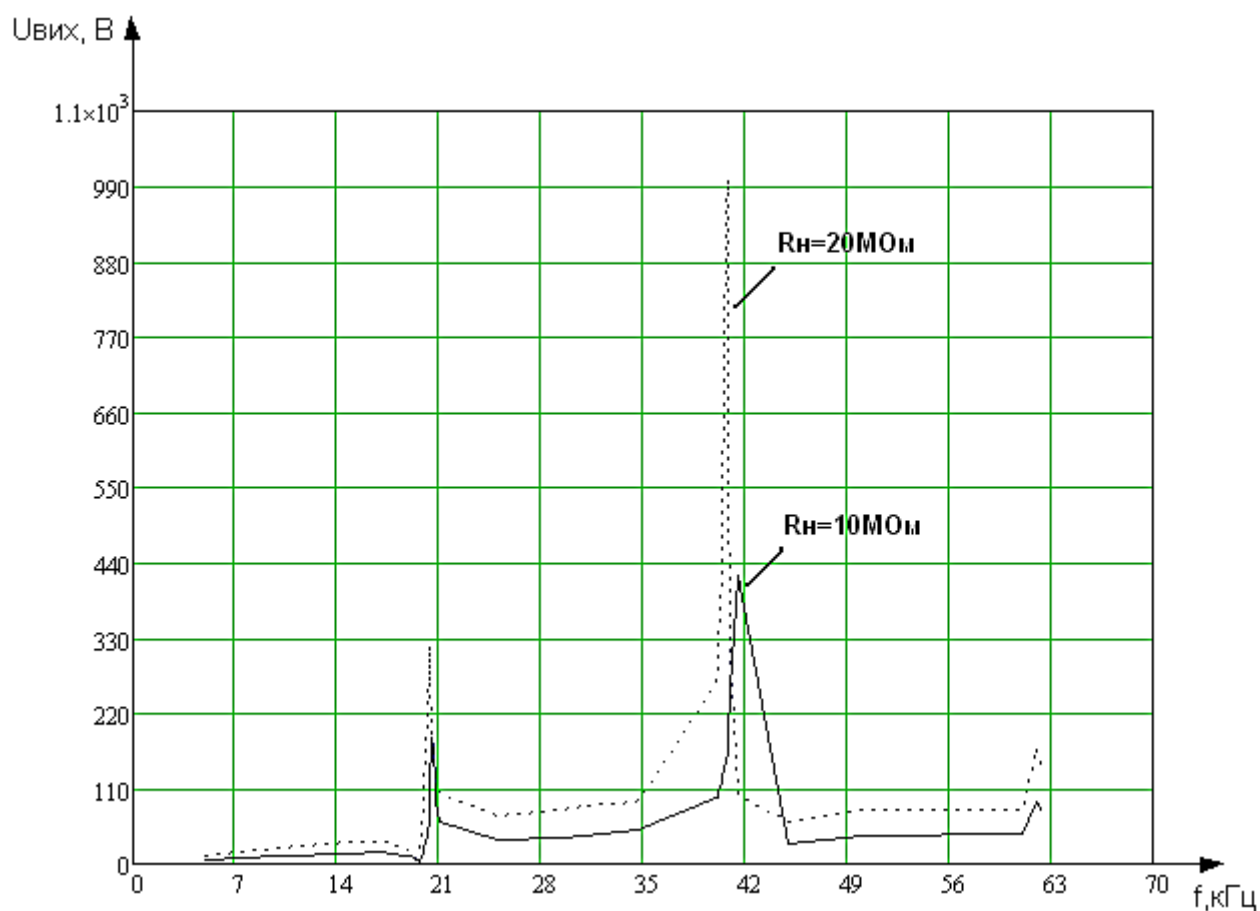


Рисунок 2.2 – Залежність вихідної напруги від частоти

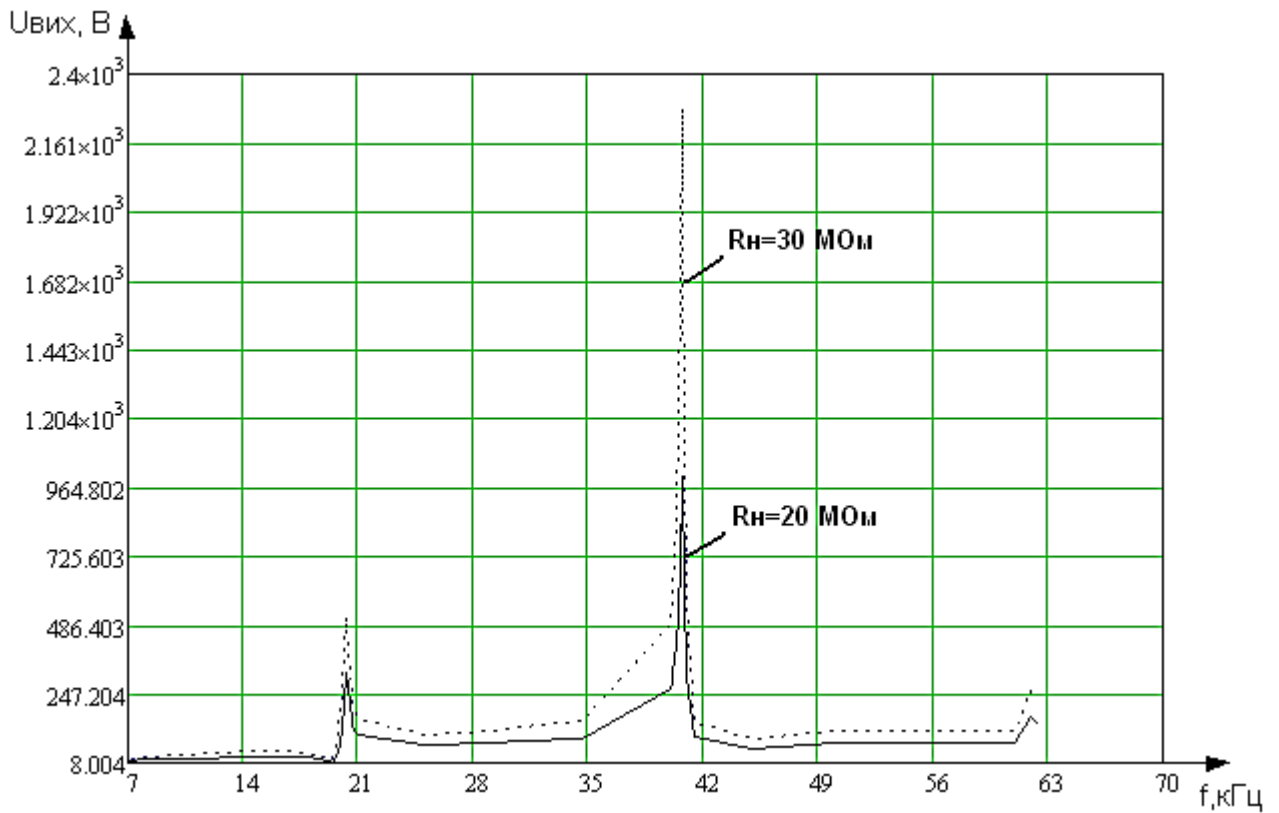


Рисунок 2.3 – Залежність вихідної напруги від частоти

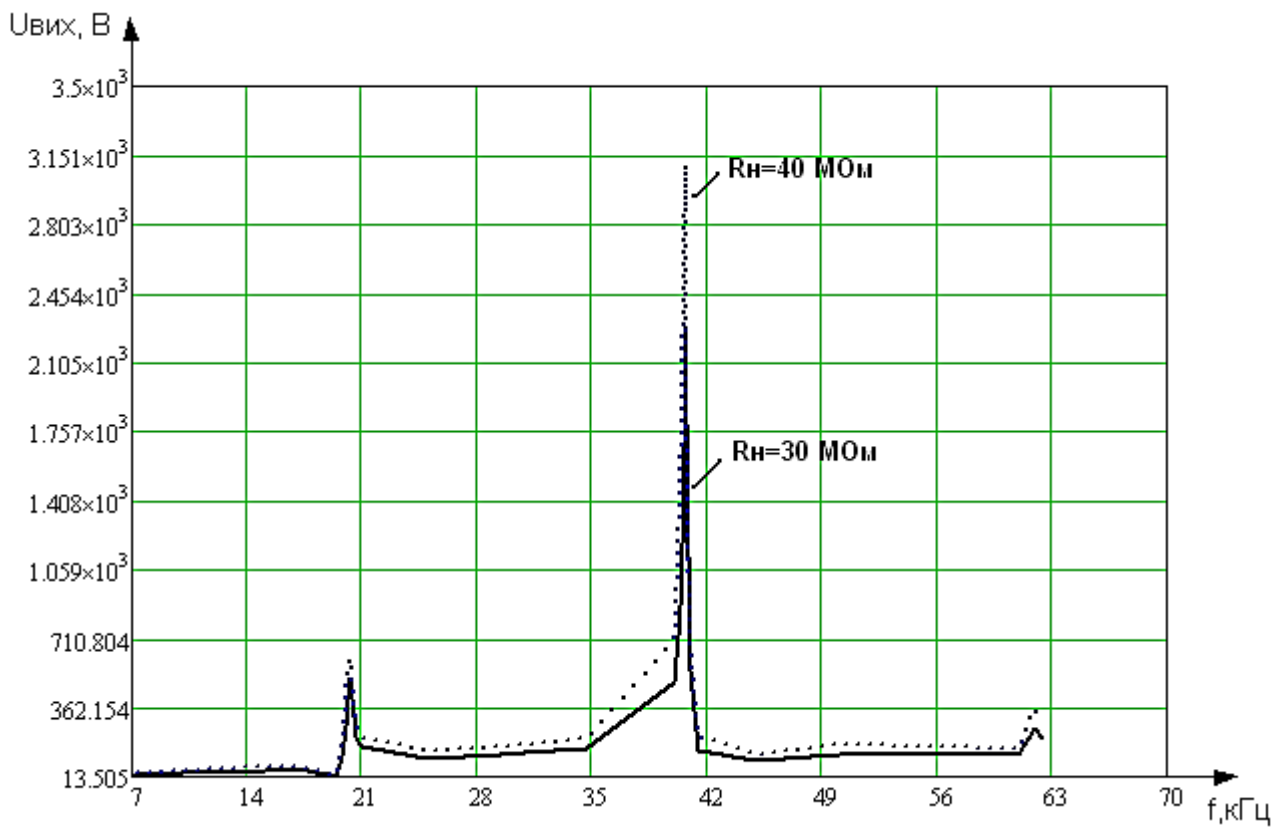


Рисунок 2.4 – Залежність вихідної напруги від частоти

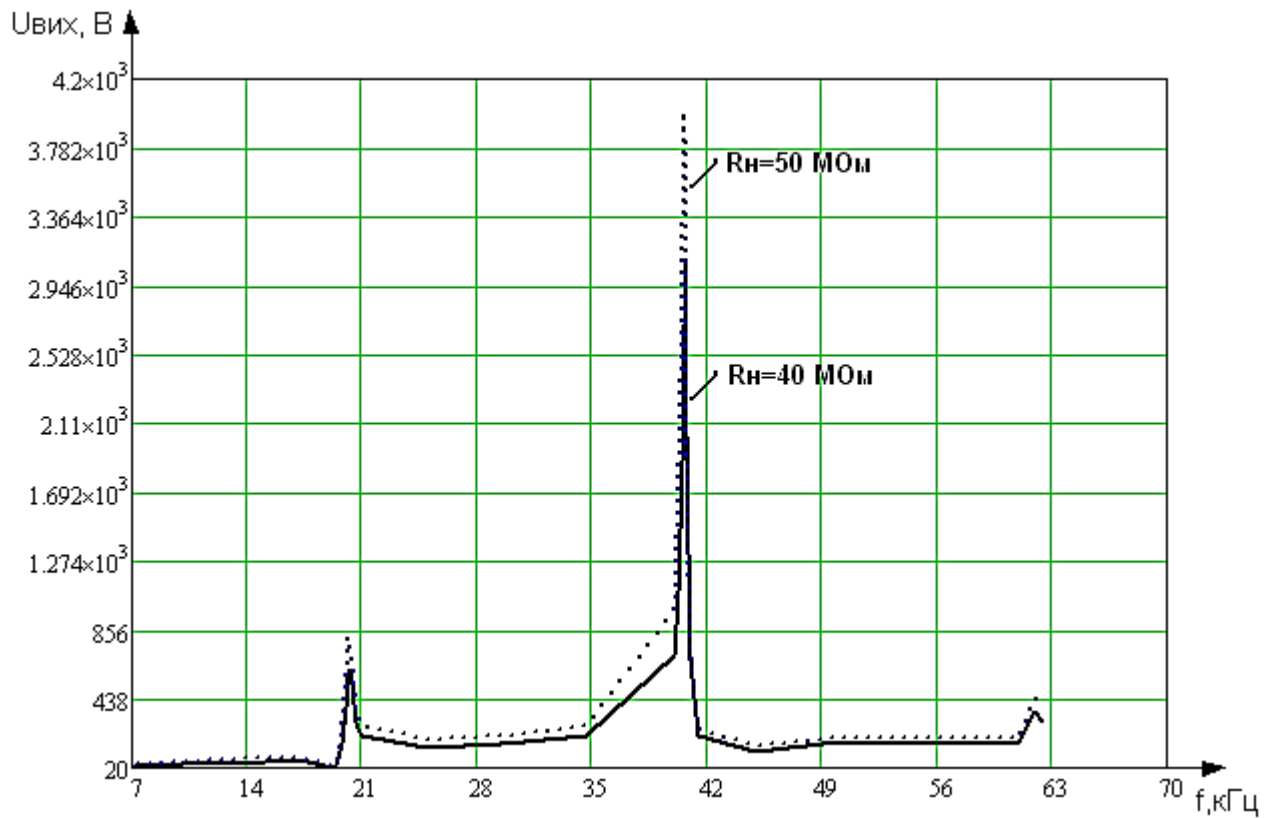


Рисунок 2.5 – Залежність вихідної напруги від частоти

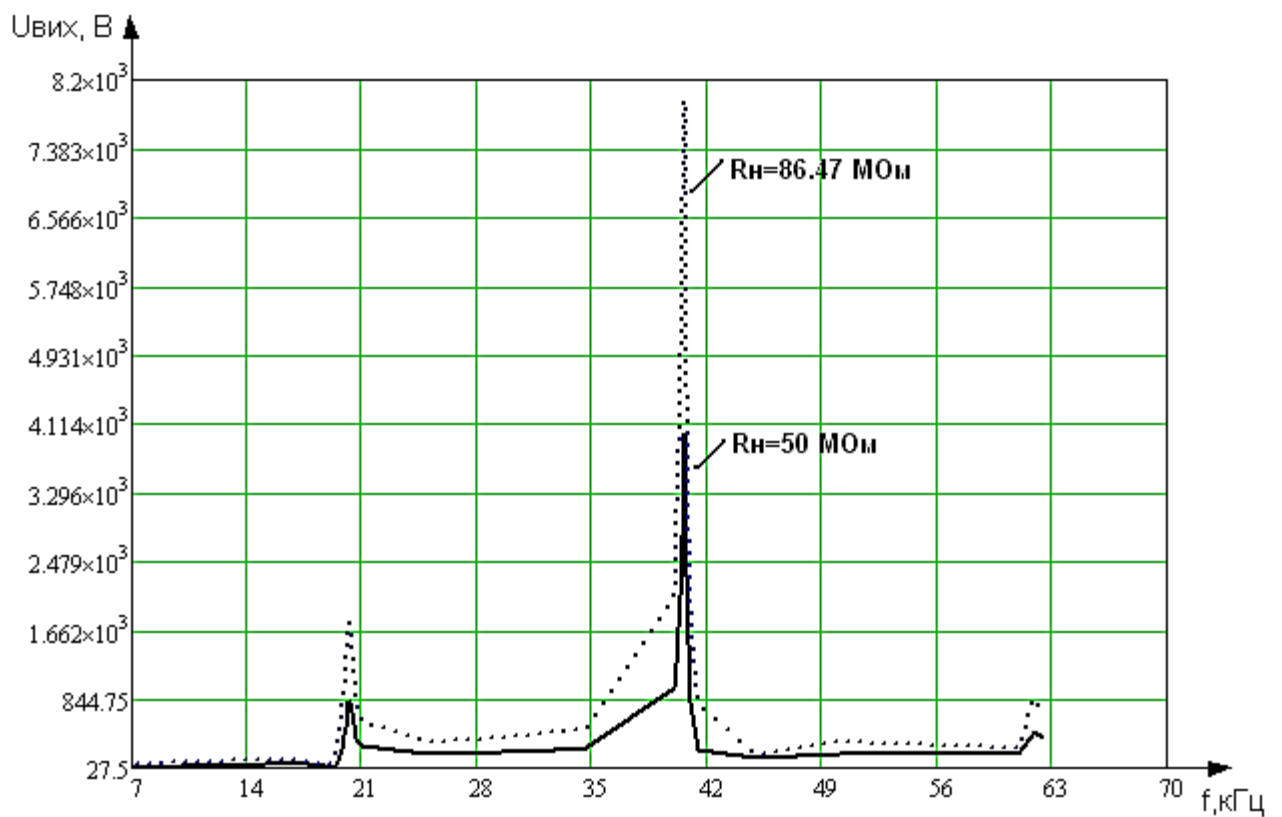


Рисунок 2.6 – Залежність вихідної напруги від частоти

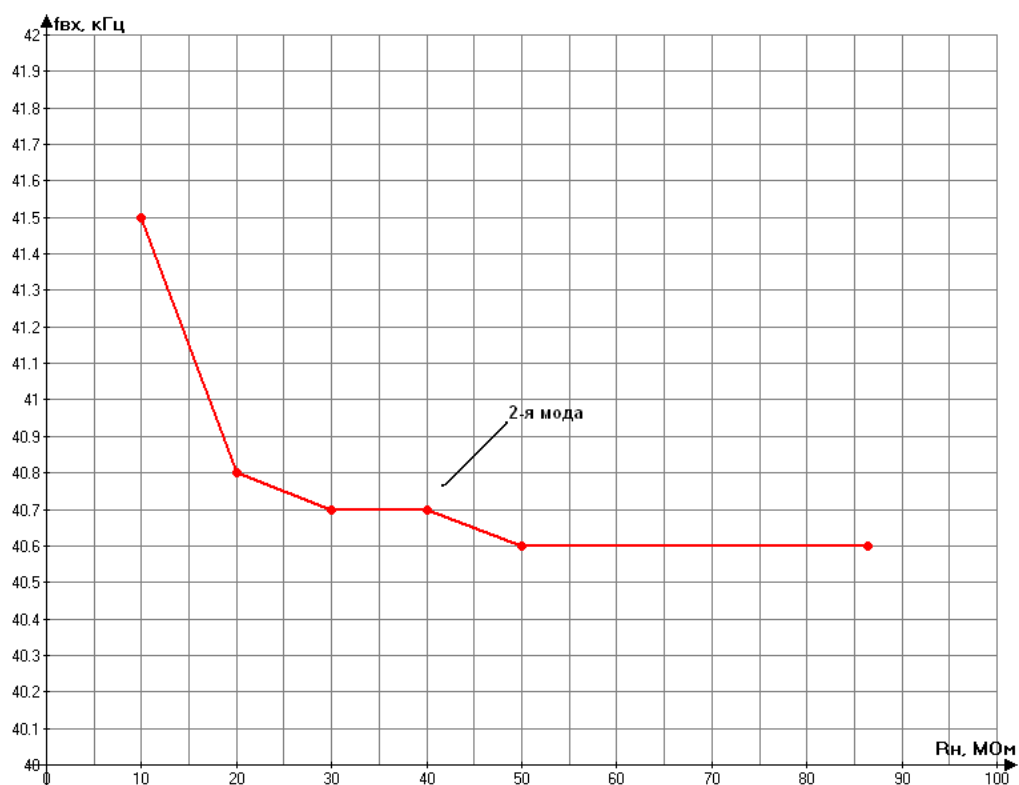


Рисунок 2.7 – Залежність зміни резонансної частоти від опору навантаження

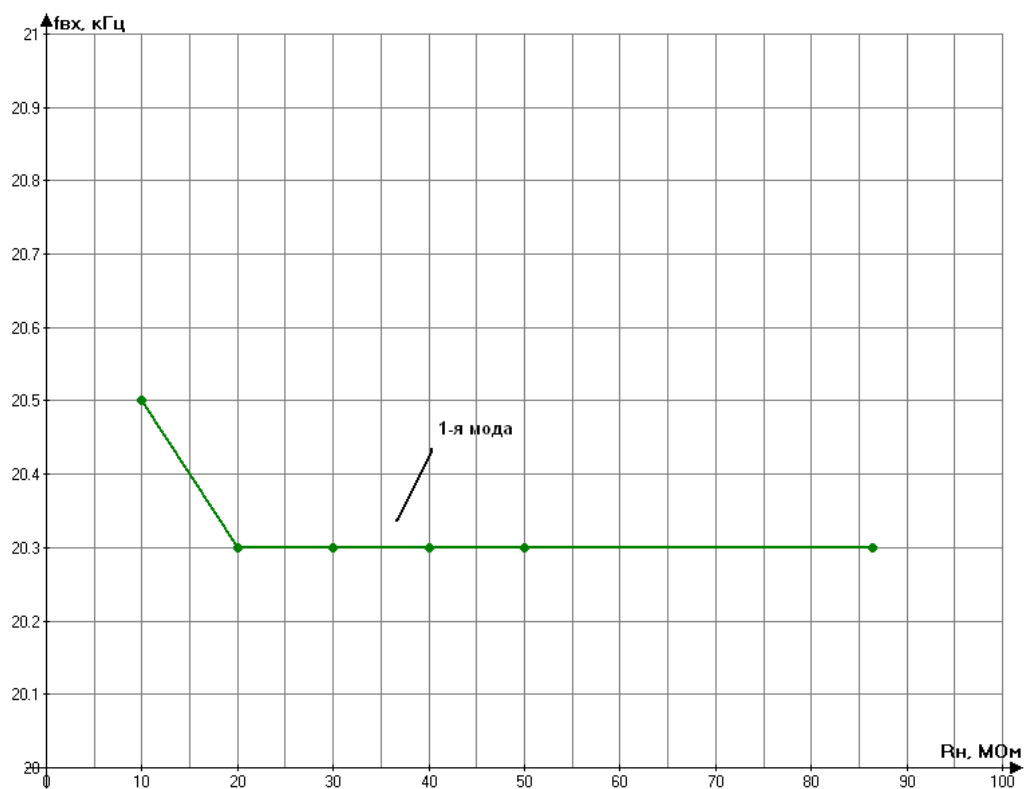


Рисунок 2.8 – Залежність зміни резонансної частоти від опору навантаження

З графіків (2.2 – 2.6) видно, що амплітуда вихідної напруги досягає свого максимуму на резонансних частотах, а резонансна частота трохи зменшується при збільшенні опору навантаження. При цьому значення вихідної напруги зі збільшенням опору навантаження збільшується.

Для зняття залежності K_U від частоти фіксувалася вхідна та вихідна напруга на різних частотах при постійному навантаженні. Коефіцієнт трансформації обчислювався за формулою:

$$\hat{E}_U = \frac{U_{\hat{A}\hat{E}\hat{O}}}{U_{\hat{A}\hat{O}}} \quad (2.1)$$

На рисунках 2.9 – 2.11 показана залежність коефіцієнта трансформації від частоти.

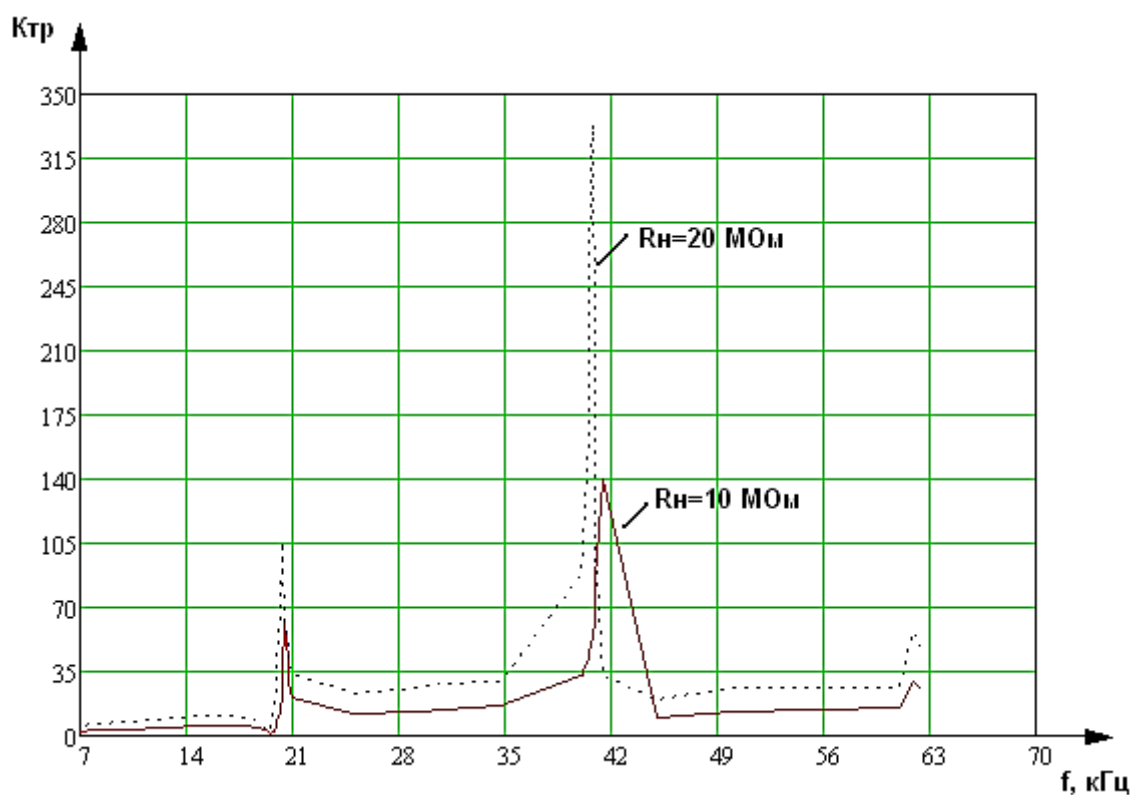


Рисунок 2.9 – Залежність коефіцієнта трансформації від частоти

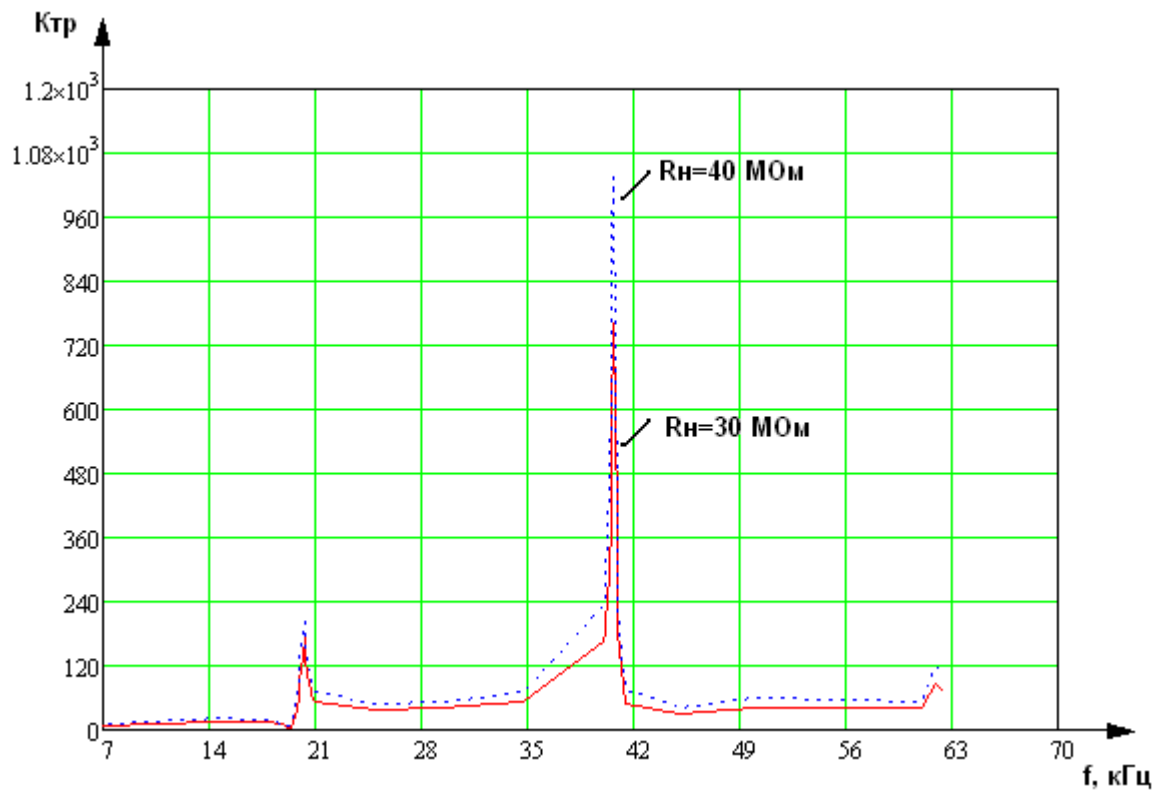


Рисунок 2.10 – Залежність коефіцієнта трансформації від частоти

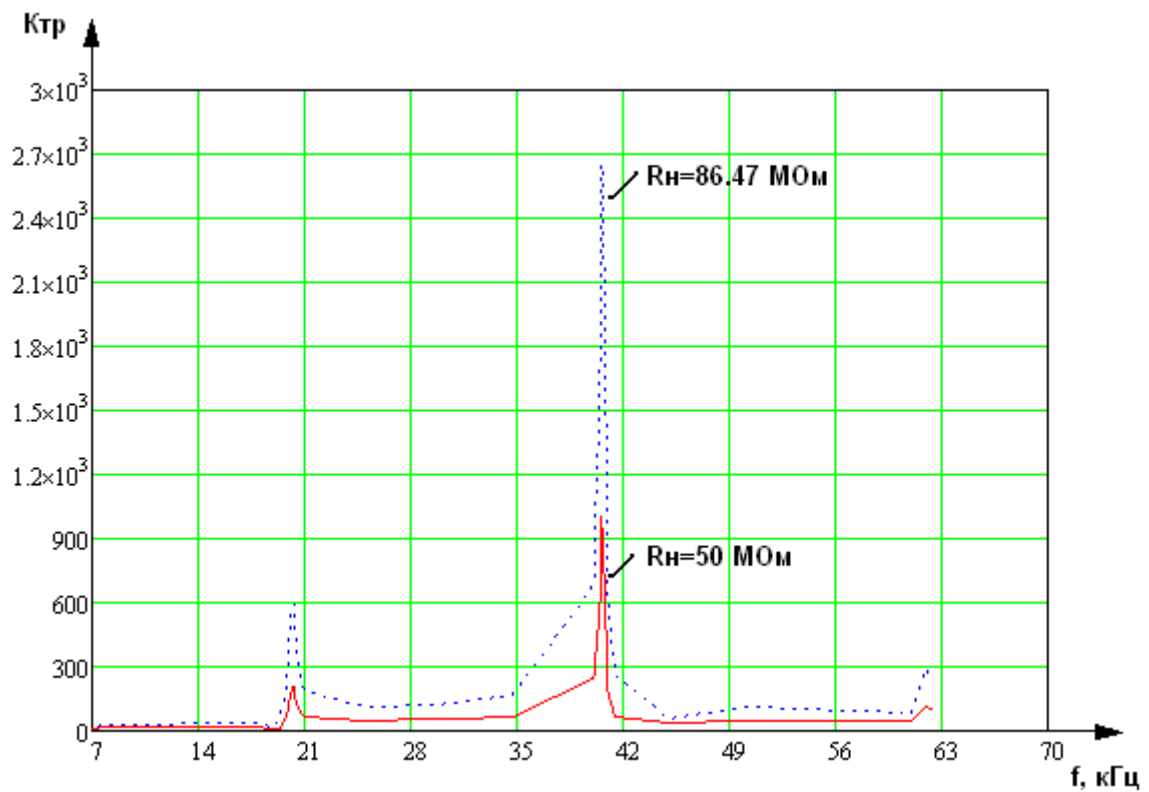


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнта трансформації від частоти

З графіків видно, що коефіцієнт трансформації у багато разів більше на резонансній частоті другої моди коливань.

На рисунку 2.12 показана залежність вихідної напруги від вхідної, отримана на частоті 20,3 кГц.

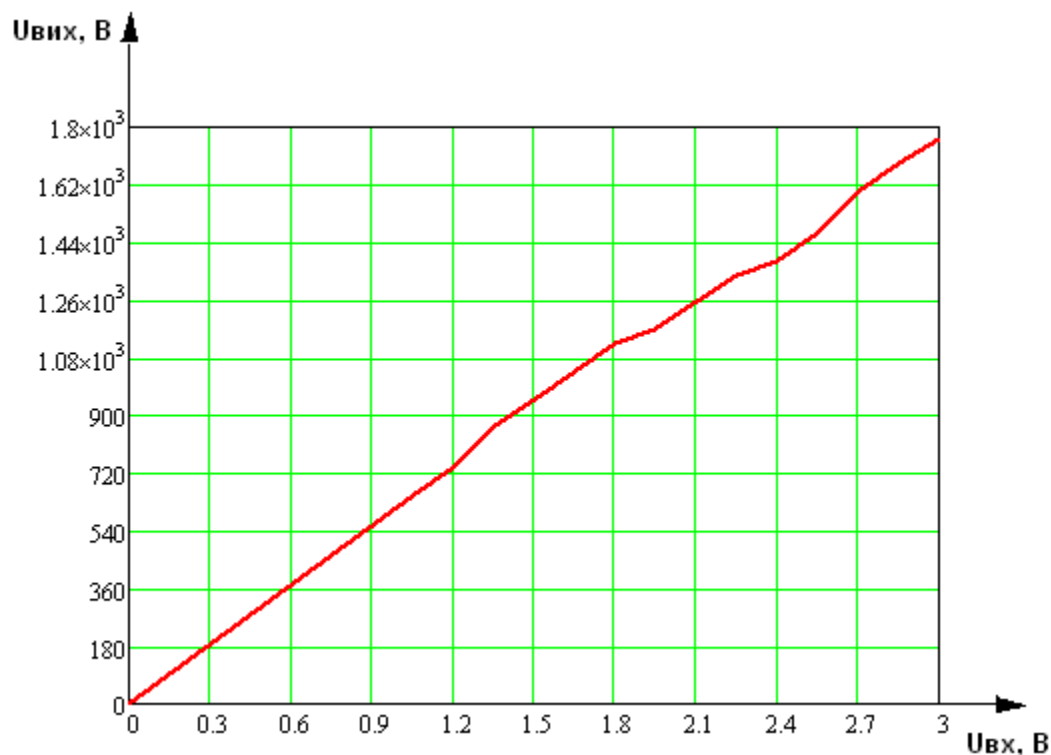


Рисунок 2.12 – Залежність вихідної напруги від вхідної

При підключенні до п'єзоелектричного трансформатора з боку входу або виходу активного опору в механічну систему вноситься додаткове загасання. Це призводить до того, що коефіцієнт трансформації залежить не лише від частоти, але й від опорів навантаження та джерела.

На рисунку 2.13 показана залежність коефіцієнта трансформації від опору навантаження п'єзоелектричного трансформатора. Характеристика досліджувалася на частоті резонансу другої моди коливань.

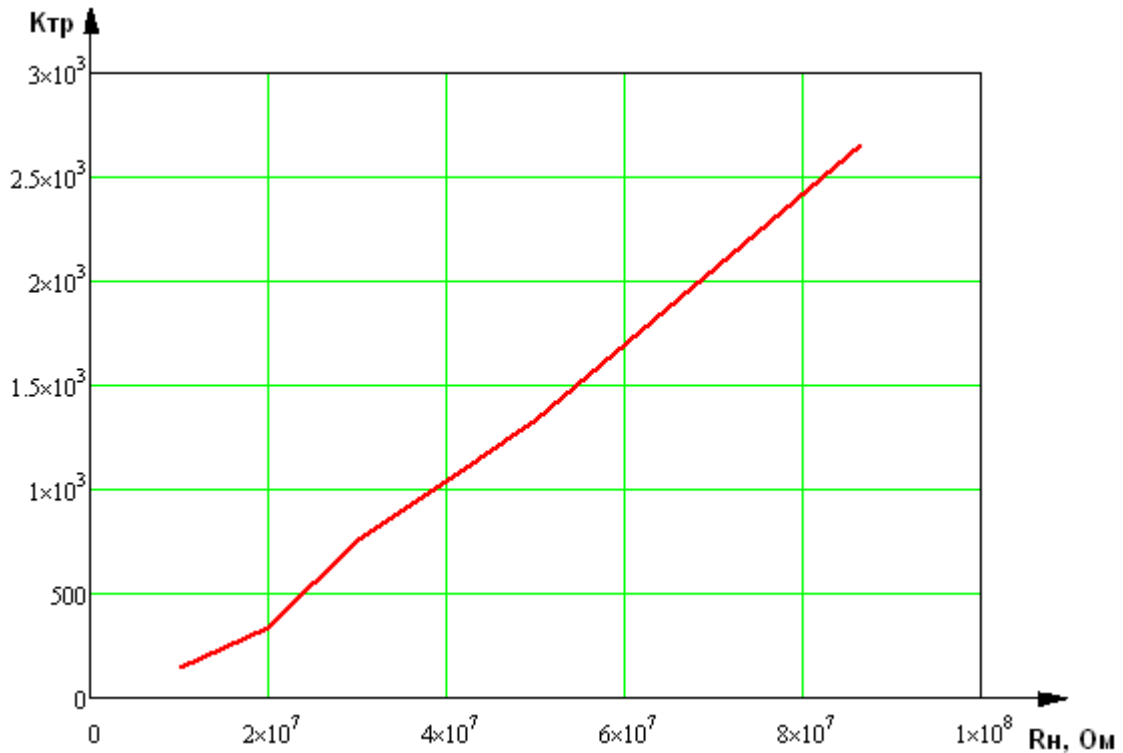


Рисунок 2.13 – Залежність коефіцієнта трансформації від опору навантаження

Як видно з рисунка, залежності мають практично лінійний характер при $R_n \leq 100 \text{ МОм}$.

2.2 Моделювання п'єзотрансформатора за допомогою САПР.

При збудженні п'єзоелемента на резонансній частоті на його електродах з'являються змінні заряди, величина й фаза яких визначаються амплітудою та фазою механічних коливань п'єзоелемента відповідно зовнішньої збудливої напруги й струму через нього. Виникає резонансна залежність опору п'єзоелемента від частоти збудливої напруги. Це дозволяє розглядати п'єзоелемент в резонансній області як електричний ланцюг (рисунок 2.14), що складається із статичної ємності C_p , динамічних індуктивності L_s та ємності C_s , активного опору втрат R_s [7].

Як послідовно-паралельний, цей контур має дві резонансні частоти: послідовного резонансу f_s та паралельного резонансу (f_p) - антирезонансу. Опір

п'єзотрансформатора на резонансній частоті мінімальний, а на антирезонансній частоті максимальний і носить активний характер.

Для моделювання вхідної частини п'єзотрансформатора була вибрана система комп'ютерної алгебри з класу систем автоматизованого проектування MathCAD.

Схема заміщення вхідної частини ПТ представлена на рисунку 2.14.

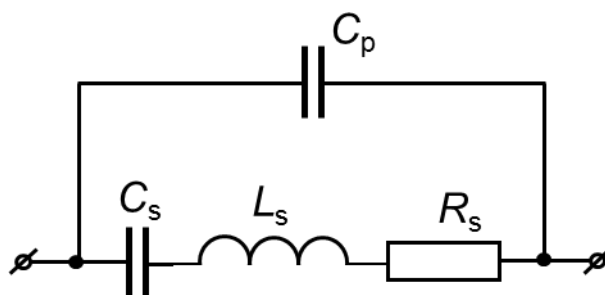


Рисунок 2.14 – Схема заміщення вхідної частини ПТ

В цій схемі є присутнім послідовний та паралельний резонанс. Частота послідовного резонансу визначається виходячи з формули 2.2 [16].

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \cdot C_s}} \quad (2.2)$$

Паралельного резонансу:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_s + C_p}{L_s \cdot C_s \cdot C_p}} \quad (2.3)$$

Опір R_s в схемі заміщення відображає втрати; L_s - динамічна індуктивність пропорційна масі.

$$L_s = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_s^2 \cdot C_s} \quad (2.4)$$

де C_s - динамічна ємність, зворотно пропорційна до механічної жорсткості пластини.

$$C_s = \left(\frac{f_p^2}{f_s^2} - 1 \right) \cdot C_p, \quad (2.5)$$

де C_p - статична ємність ПТ, Ф [16].

Значення опору (R_s), що відображає активні втрати при коливаннях складе:

$$R_s = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot L_{\ddot{a}}}{Q_i}, \quad (2.6)$$

де Q_m - механічна добротність [16].

За отриманими експериментальними даними, виходячи з формул 2.4 – 2.6, були розраховані L_s , C_s та R_s .

$$R_s=35.7 \text{ Ом}; C_p=2400 \text{ пФ}; L_s=0.028 \text{ Гн}; C_s=548.4 \text{ пФ}.$$

Т.я. для визначення умов виникнення режиму резонансу в електричному колі треба знайти його комплексний опір, запишемо:

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.7)$$

$$\text{де } Z_1 = R_s + jX_{L_s} - jX_{C_s};$$

$$Z_2 = -jX_{C_p}.$$

Отримуємо:

$$Z = \frac{R_S \cdot X_{C_p}^2}{R_S^2 + (X_{L_s} - X_{C_s} - X_{C_p})^2} - j \frac{X_{C_p} (R_S^2 + X_{L_s}^2 - 2X_{L_s} X_{C_s} - X_{L_s} X_{C_p} + X_{C_s}^2 + X_{C_s} X_{C_p})}{R_S^2 + (X_{L_s} - X_{C_s} - X_{C_p})^2}$$

Виділимо реальну та уявну частину. Нехай $a = \text{Re}(Z)$; $b = \text{Im}(Z)$

Знаходимо повний опір контура як:

$$Z = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.8)$$

За допомогою MathCAD знаходимо Z і будемо графік опору послідовно-паралельного коливального контура.

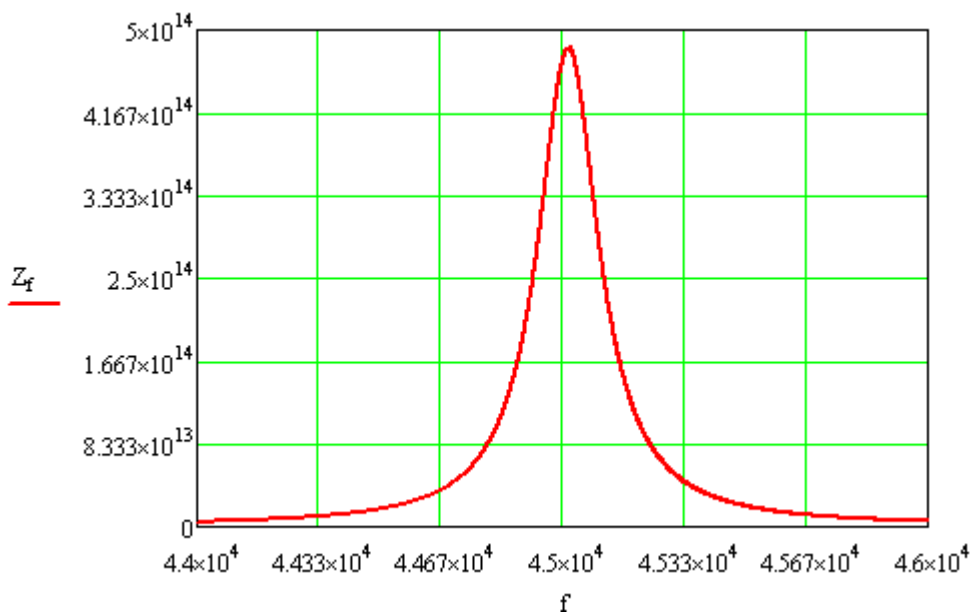


Рисунок 2.15 – Діаграма опору послідовно-паралельного коливального контура

Залежність повного опору від частоти є резонансною кривою, що має максимум при антирезонансній частоті. При цьому результати розрахунку не показали послідовного резонансу, при якому повний опір набуває мінімального значення.

Проведемо моделювання цієї схеми в системі OrCAD [17].

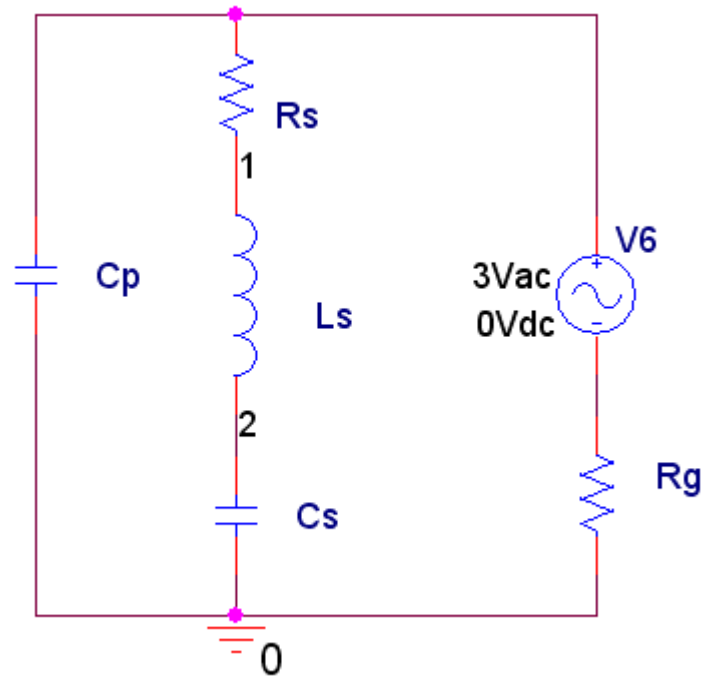


Рисунок 2.16 – Схема заміщення вхідної частини ПТ в OrCAD

Нижче представлена діаграма напруги послідовно-паралельного коливального контура.

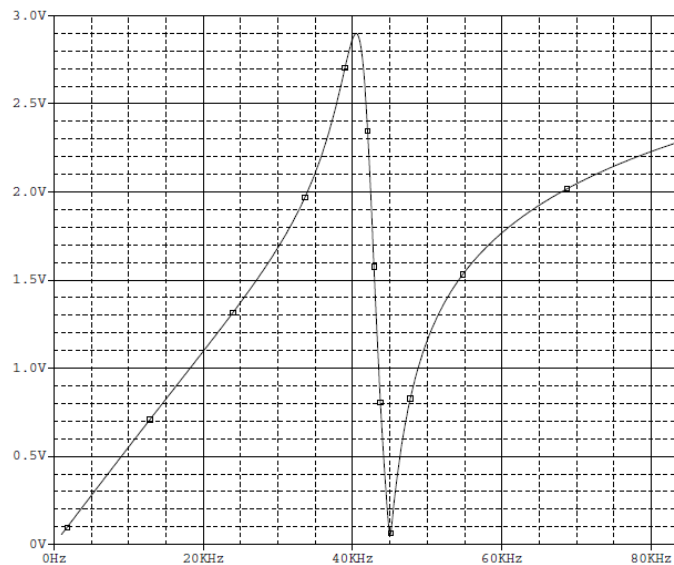


Рисунок 2.17 – Діаграма напруги послідовно-паралельного коливального контура

Для подальшого дослідження характеристик п'єзотрансформатора в якості системи автоматизованого проектування була вибрана система OrCAD v.9.2 [17].

Еквівалентна схема ПТ показана на рисунку 2.18 і складається з двох секцій, одна з яких є збудником, інша – генератором [4].

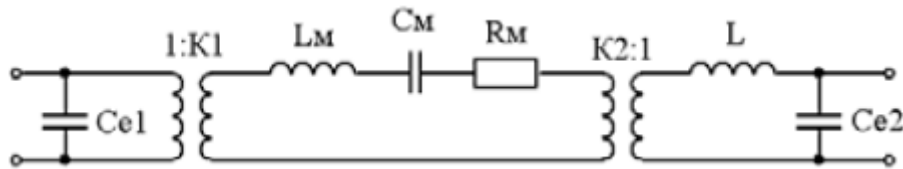


Рисунок 2.18 – Еквівалентна схема ПТ поперечно-подовжнього типу

Еквівалентна схема ПТ складається з трьох частин. Перша частина – електрична (з вхідною ємністю C_{e1}), підключається до джерела живлення, третя - теж електрична (з вихідною ємністю C_{e2} та індуктивністю L), до неї підключається навантаження. Ці дві частини з'єднує між собою механічна частина у вигляді комплексного опору (елементи L_m , C_m , R_m) яке може мати ємнісний або індуктивний характер та перетворюватися на нуль на частоті резонансу. Всі частини ПТ з'єднені між собою ідеальними трансформаторами з різними коефіцієнтами трансформації (K_1 , $1/K_2$). Один з трансформаторів є знижуючим, інший – підвищувальним [18].

Всі параметри ПТ розраховуються за формулами 2.9-2.17, при цьому враховуються дані про конструктивні особливості ПТ залежно від матеріалу з якого виготовлений ПТ.

Основні формули для розрахунку [4]:

$$C_{e1} = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot (1 - K_{31}^2) \cdot b' \cdot L'}{a'} \quad . \quad (2.9)$$

$$C_{e2} = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot (1 - K_{33}^2) \cdot a'' \cdot b''}{L''} \quad . \quad (2.10)$$

$$K_1 = 2 \cdot b' \cdot d_{31} \cdot Y_{31}^p \quad . \quad (2.11)$$

$$K_2 = \frac{2 \cdot K_{33}^2 \cdot a'' \cdot b''}{g_{33} \cdot L''} . \quad (2.12)$$

$$C_M = \frac{L'}{\pi^2 \cdot a' \cdot b' \cdot Y_{31}^p} . \quad (2.13)$$

перша мода коливань :

$$R_M = \frac{2 \cdot \pi \cdot a' \cdot b' \cdot \sqrt{\rho \cdot Y_{31}^p}}{Q_M} . \quad (2.14)$$

$$L_M = 4 \cdot a' \cdot b' \cdot L' \cdot \rho . \quad (2.15)$$

друга мода коливань :

$$R_M = \frac{\pi \cdot a' \cdot b' \cdot \sqrt{\rho \cdot Y_{31}^p}}{Q_M} . \quad (2.16)$$

$$L_M = a' \cdot b' \cdot L' \cdot \rho . \quad (2.17)$$

де ϵ_{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;

ω – кругова частота; d_{31} – п'єзоелектричний модуль;

Y_{31}^{10} – модуль Юнга;

g_{33} – чутливість;

ρ – щільність;

Q_M – механічна добротність.

Значення електрофізичних параметрів трансформатора ТП-Р1 801403 приведені в таблиці 2.8 [19].

Таблиця 2.8 – Значення електрофізичних параметрів трансформатора ТП-Р1 801403

Тип	Частота основного резонансу, кГц	Електрична ємність вхідної секції, пФ	Електрична ємність вихідної секції, пФ	Тангенс кута діелектричних втрат вхідної секції, не більше	Коефіцієнт корисної дії при навантаженні 30 МОм, не менше
ТП-Р1 801403	19-22	2100-2800	10,7-19,9	0,01	0,5

На рисунку 2.19 представлена модель п'єзотрансформатора ТП-Р1 801403, побудована за допомогою прикладної програми Capture CIS з пакету OrCAD.

Таблиця 2.9 - Фізичні й електричні властивості п'єзокераміки ЦТС- 24 [20]

Параметр	Символ	Одиниця виміру	Значення
Відносна діелектрична проникність	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	–	950
Тангенс кута діелектричних втрат	$\tan \delta$	–	0,0075
Коефіцієнти електромеханічного зв'язку	K_p	–	0,52
	K_{31}	–	0,30
	K_{33}	–	0,62
П'єзоелектричні модулі	d_{31}	Кл/Н	$100 \cdot 10^{-12}$
	d_{33}		$200 \cdot 10^{-12}$
Чутливість	g_{31}	$\frac{В \cdot м}{Н}$	$10,5 \cdot 10^{-3}$
	g_{33}	Н	$21,0 \cdot 10^{-3}$
Частотна постійна	N_p	Гц · м	$2,2 \cdot 10^3$
Модуль Юнга	Y_{31}^{10}	Н/м ²	$7,5 \cdot 10^{10}$
Коефіцієнт Пуасона	σ	–	0,29
Пружна твердість	S_{11}^E	м ² /Н	$11,5 \cdot 10^{-12}$
	S_{33}^E		$15,4 \cdot 10^{-12}$
Межа механічної міцності при статичному розтяганні/стиску	$\sigma_{роз}$	Н/м ²	$18,6 \cdot 10^6$
	$\sigma_{ст}$		$343 \cdot 10^6$
Швидкість звуку	v_i^j	м/с	3550
Механічна добротність	Q_M	–	200
Точка Кюрі	T_K	°С	270
Щільність	ρ	кг/м ³	7400

Таблиця 2.10 – Розрахункові параметри повної еквівалентної схеми п'єзотрансформатора ТП-Р1 801403

Номер моди КОЛИВАНЬ	C_{e1} , пФ	C_{e2} , пФ	K_1	$1/K_2$	L , Гн	C_M , пФ	R_M , Ом	L_M , Гн
1-я	1428,154	5,434	0,21	26,015	11,311	1286,618	31,085	0,05
2-я	1428,154	5,434	0,21	26,015	2,828	1286,618	15,542	0,012

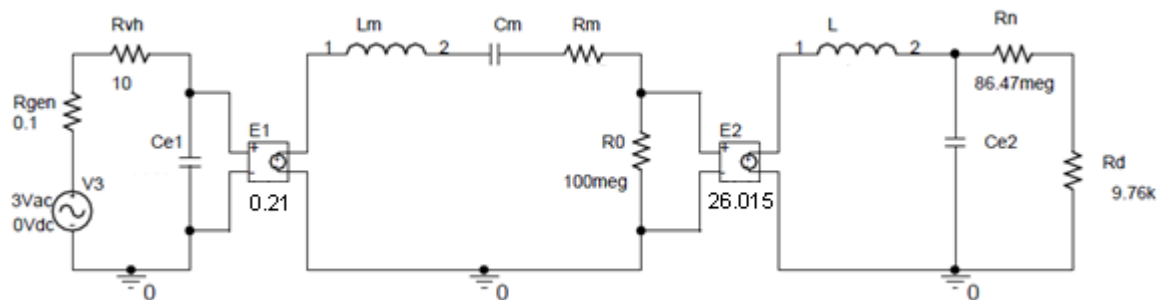


Рисунок 2.19 – Модель п'єзотрансформатора ТП-Р1 801403

На рисунку 2.20 представлена експериментальна амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) ПТ ТП-Р1 801403 при амплітуді вхідної напруги 3 В. На рисунку 2.21 показана АЧХ отримана за результатами моделювання.

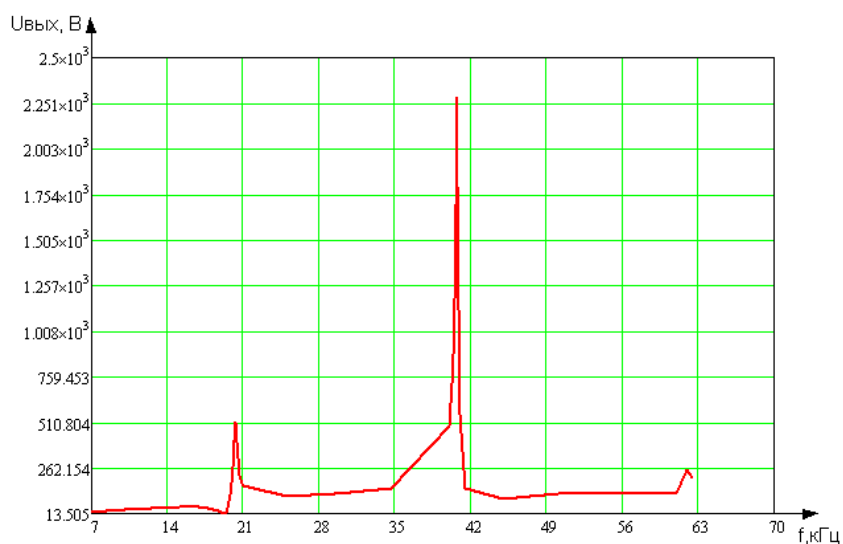


Рисунок 2.20 – АЧХ ПТ за результатами експерименту

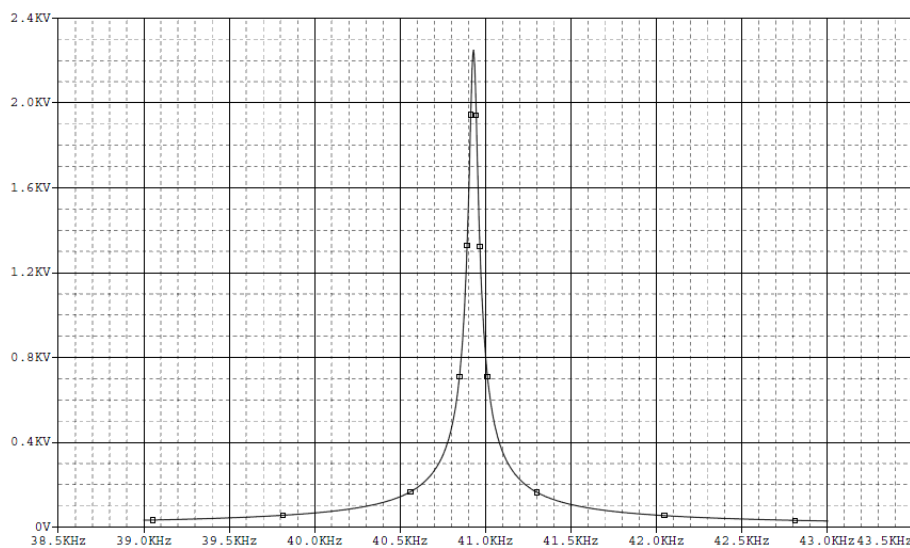


Рисунок 2.21 – АЧХ ПТ за результатами моделювання

2.3 Дослідження паралельного і послідовного включення п'єзотрансформаторів.

2.3.1 Загальні засади.

Оскільки одним з недоліків п'єзоелектричних трансформаторів є їх невисока вихідна потужність (одиниці ват), доцільно розглянути можливість одночасного включення в схему декількох п'єзотрансформаторів. Для вирішення проблеми підвищення вихідної потужності п'єзотрансформаторів було вирішено дослідження класичних методів підвищення потужності, які успішно застосовуються на практиці відносно інших елементів та пристроїв електроніки, а саме послідовне і паралельне включення. Наприклад, в електромагнітному трансформаторі для збільшення вихідної напруги з'єднують послідовно декілька вторинних обмоток, а для збільшення вихідного струму – паралельно [21]. Результати, отримані в результаті досліджень, дозволять допомогти інженерам при розробці джерел вторинного електроживлення.

2.3.2 Моделювання послідовного включення двох п'єзоелектричних трансформаторів.

Теоретично при послідовному (каскадному) з'єднанні декількох п'єзотрансформаторів результуючий коефіцієнт трансформації ($k_{\text{ТР}}$) дорівнюватиме сумі $k_{\text{ТР}}$ кожного ПТ. Таким чином, з'єднуючи послідовно декілька п'єзотрансформаторів, можна отримати більшу напругу на навантаженні, ніж при використанні одного ПТ (при одній і тій же вхідній напрузі). Схема послідовного з'єднання приведена на рисунку 2.22. В якості моделі п'єзоелектричного трансформатора була вибрана модель п'єзотрансформатора ТП-Р1 801403.

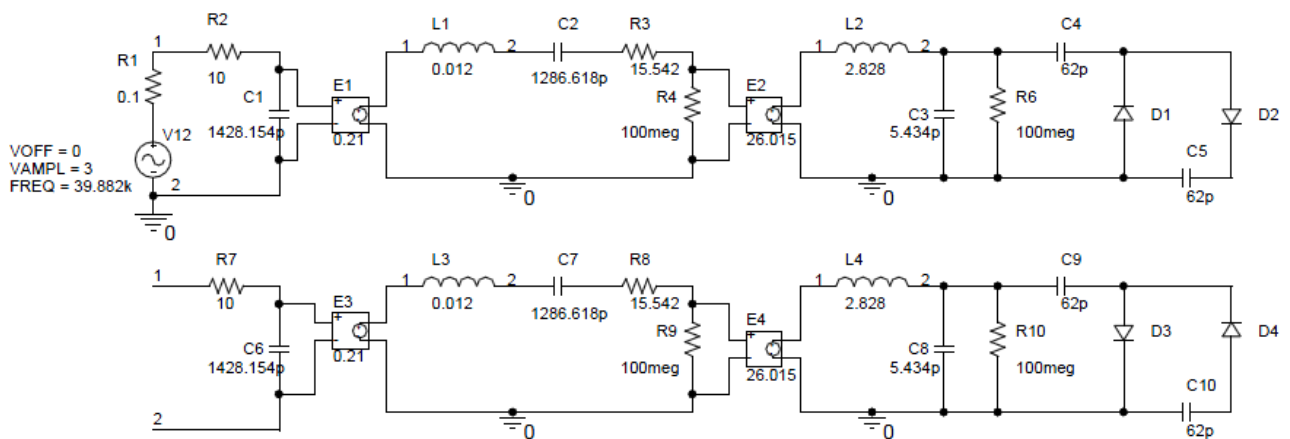


Рисунок 2.22 – Схема послідовного з'єднання двох ПТ

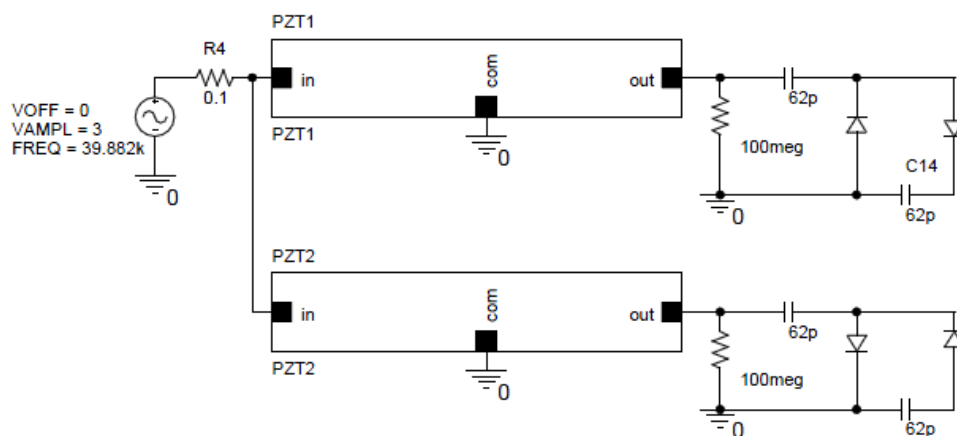


Рисунок 2.23 – PSpice-модель послідовного з'єднання двох ПТ у вигляді ієрархічних блоків

Конденсатори C_4, C_5, C_9, C_{10} і діоди $VD_1 - VD_4$ утворюють помножувач напруги на виході кожного з п'єзотрансформаторів, який дозволяє не лише помножити вихідну напругу, але й дає можливість послідовного з'єднання ПТ.

Можна припустити, що резонансна частота в даному випадку декілька зміниться через наявність у вихідному колі ПТ ємності помножувача напруги. Проведемо аналіз АЧХ за допомогою застосовної програми Capture CIS з пакету OrCAD.

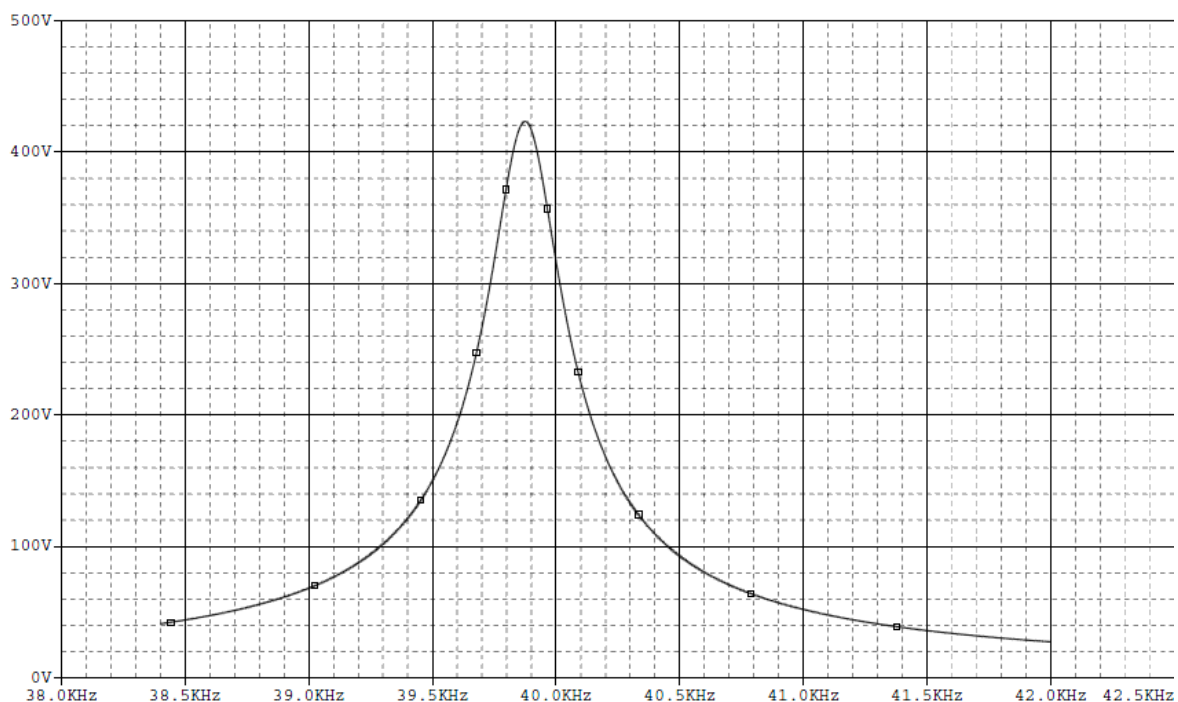


Рисунок 2.24 – АЧХ ПТ при послідовному з'єднанні

Як бачимо з графіку резонансна частота змінилася в меншу сторону і складає 39,882 кГц.

Задамо частоту вхідного сигналу що відповідає резонансній (39,882 кГц) і поспостерігаємо вихідну амплітуду одного ПТ.

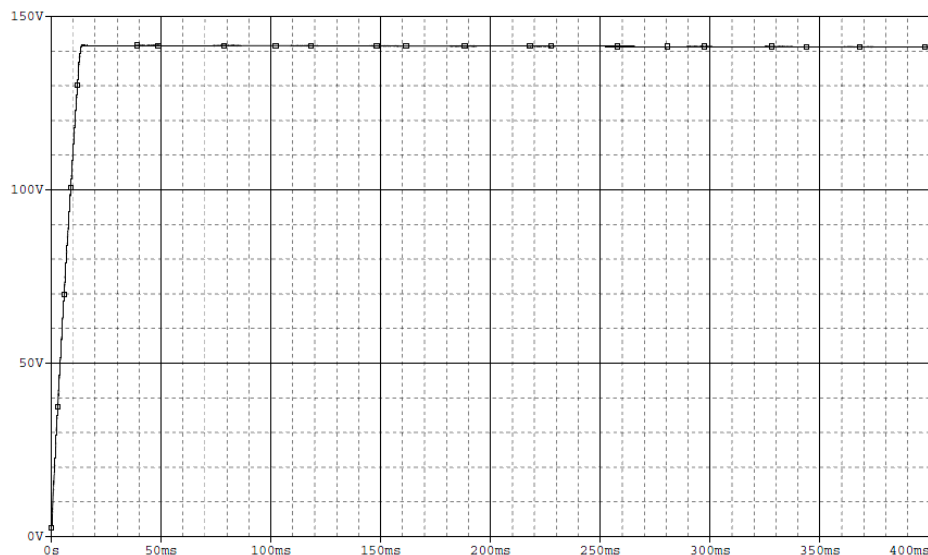


Рисунок 2.25 – Вихідна напруга одного ПТ на частоті 39,882 кГц

Вихідна напруга одного п'єзотрансформатора на частоті 39,882 кГц становила 141,6 В. На рисунку 2.26 приведений графік вихідної напруги двох послідовно з'єднаних п'єзоелектричних трансформаторів.

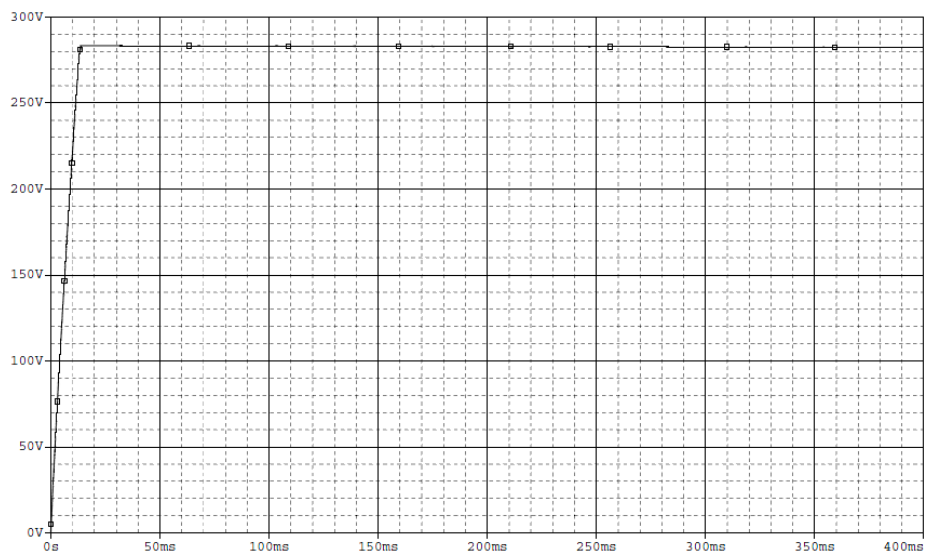


Рисунок 2.26 – Вихідна напруга двох послідовно з'єднаних ПТ на частоті 39,882 кГц

Вихідна напруга двох послідовно з'єднаних п'єзотрансформаторів на частоті 39,882 кГц становила 283,2 В, що удвічі більше вихідної напруги одного ПТ. В усіх випадках амплітуда вхідної напруги дорівнювала 3 В. Отже можна відмітити, що при

послідовному з'єднанні декількох ПТ, у випадку рівній вхідній напрузі сигналу і частоті, вихідна напруга збільшуватиметься у n разів, де n - кількість п'єзотрансформаторів.

2.3.3 Моделювання паралельного включення двох п'єзоелектричних трансформаторів.

Паралельне з'єднання різних вузлів електроніки (джерел живлення, вторинних обмоток електромагнітних трансформаторів і так далі) збільшує їх здатність до навантаження, тобто дозволяє отримати більший вихідний струм. Можна припустити, що такий ефект можна отримати і від декількох паралельно сполучених п'єзоелектричних трансформаторів. Дослідження такого явища дуже актуальне, оскільки одним з основних недоліків п'єзотрансформаторів є їх мала вихідна потужність, а ефект, отриманий від їх паралельного з'єднання, міг би частково усунути цей недолік при використанні ПТ в різних електронних схемах. При паралельному з'єднанні елементів вихідна потужність збільшується, але в той же час збільшується і споживана потужність. Проте, максимальна вихідна потужність дорівнює сумі максимальних потужностей кожного елементу.

Промодельуємо паралельне з'єднання ПТ за допомогою прикладної програми Capture CIS з пакету OrCAD.

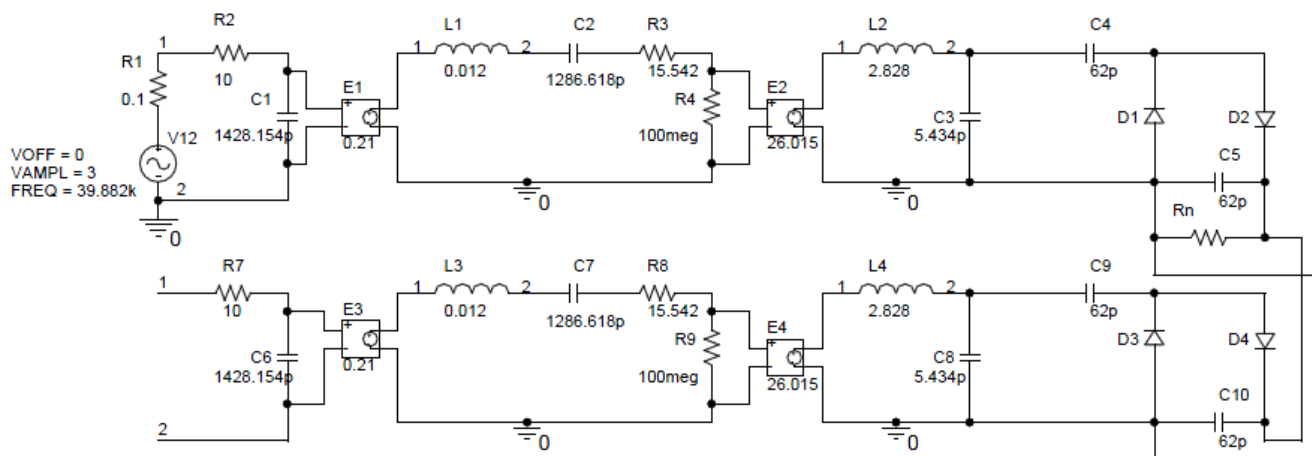


Рисунок 2.27 – Схема паралельного з'єднання двох ПТ

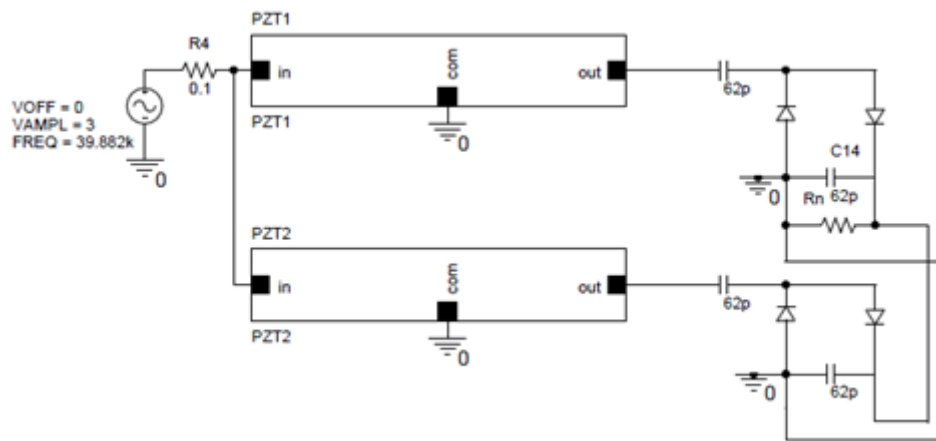


Рисунок 2.28 – PSpice-модель паралельного з'єднання двох ПТ у вигляді ієрархічних блоків

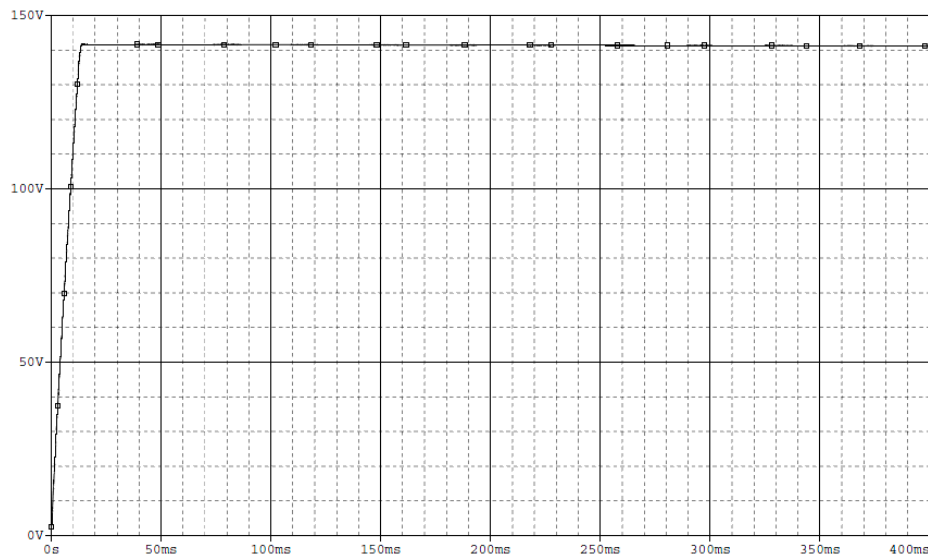


Рисунок 2.29 – Вихідна напруга двох паралельно з'єднаних ПТ на частоті 39,882 кГц

За результатами моделювання побудуємо залежність вихідної напруги від опору навантаження та вихідного струму від вихідної напруги.

$$I_{\hat{A}\hat{U}\hat{\sigma}} = \frac{U_{\hat{A}\hat{U}\hat{\sigma}}}{R_f}, \quad (2.18)$$

де $U_{\text{ВЫХ}}$, $I_{\text{ВЫХ}}$ – вихідна напруга і вихідний струм ПТ;

$R_{\text{Н}}$ – опір навантаження, МОм.

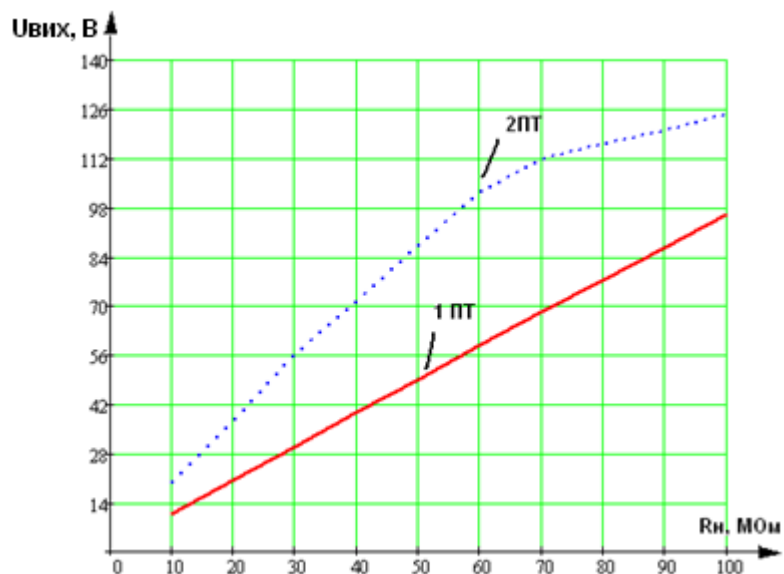


Рисунок 2.30 – Залежність вихідної напруги ПТ від опору навантаження

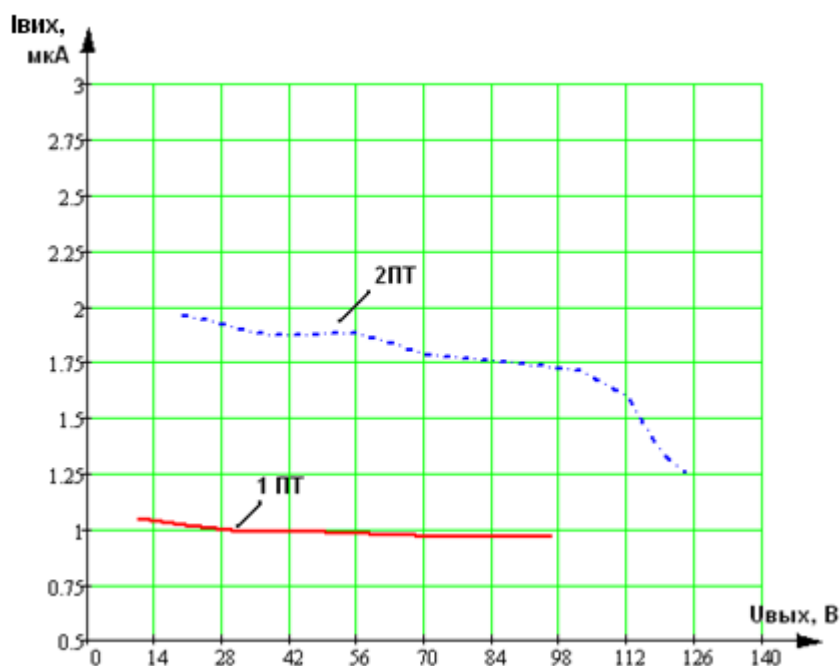


Рисунок 2.31 – Залежність вихідного струму ПТ від вихідної напруги

Із характеристик на рисунках 2.30-2.31 видно, що включення двох паралельно з'єднаних п'єзоелектричних трансформаторів збільшує здатність до навантажень практично у два рази. Варто відмітити, що амплітуда вихідної напруги в реальних умовах може відрізнятися від тієї, яка приведена за результатами моделювання, т.я.

сама модель ПТ не враховує усіх властивостей п'єзотрансформатора, а також їх взаємного впливу один на одного.

2.3.4 Експериментальна частина.

Для проведення експерименту використовувалися багатошарові п'єзоелектричні трансформатори поперечно-подовжнього типу, що виготовлені з матеріалу ЦТССт-3, ТП-РМ 350502. Габаритні розміри досліджуваних трансформаторів приведені на рисунку 2.32, а також в таблиці 2.11. Параметри п'єзоелектричних трансформаторів приведені в таблиці 2.12 [19].

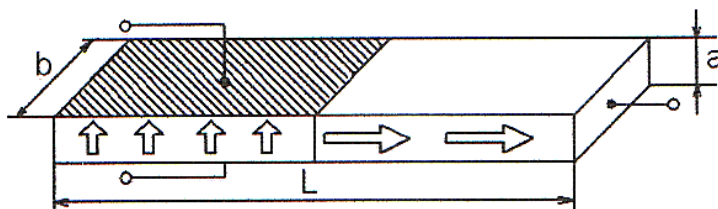


Рисунок 2.32 – Габаритні розміри п'єзотрансформатора

Таблиця 2.11 – Габаритні розміри ПТ

Тип ПТ	Габаритні розміри		
	Довжина, L, мм	Ширина, b, мм	Товщина, a, мм
ТП-РМ 350502	$35 \pm 1,7$	$5 \pm 0,25$	$2 \pm 0,2$

Таблиця 2.12 – Параметри п'єзоелектричного трансформатора

Тип ПТ	Номінальне значення резонансної частоти при $R_H = 100 \text{ Мом, кГц}$			Вхідна робоча напруга $U_{вх}, \text{В}$		Коефіцієнт корисної дії, η при $U_{вх} = 5 \text{ В, } R_H = 15 \text{ Мом}$
	1-я мода	2-я мода	пред. Откл., %	$R_H = 100 \text{ Мом}$	$R_H = 15 \text{ Мом}$	
ТП-РМ 350502	48	96	± 10	3	5	1-я мода
						0,5

Схема включення одного ПТ показана на рисунку 2.33. Зовнішній вигляд п'єзотрансформаторів, а також стенду на якому проводилися дослідження показаний на рисунку 2.34.

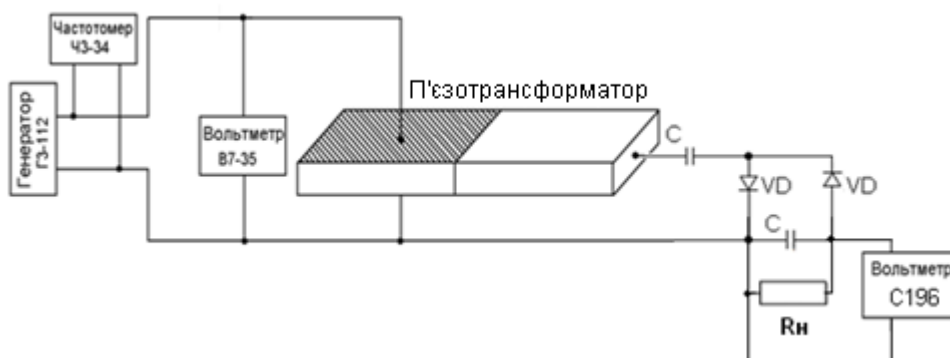


Рисунок 2.33 – Схема включення одного ПТ

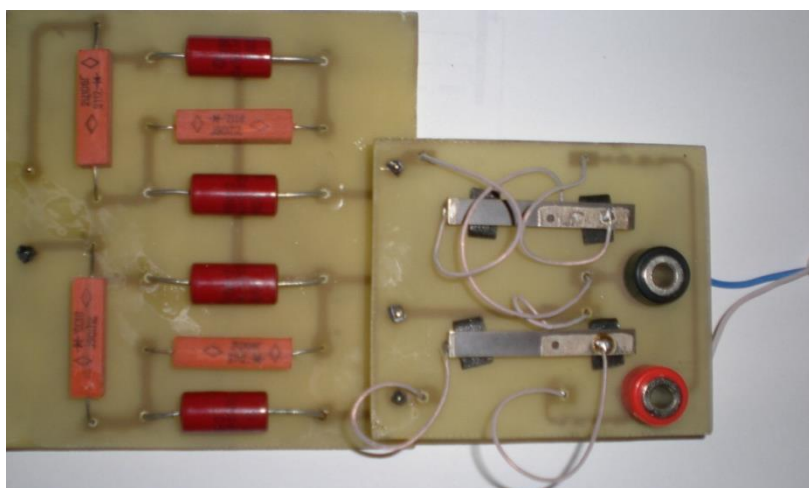


Рисунок 2.34 – Зовнішній вигляд стенду для дослідження послідовного і паралельного включення двох ПТ

За допомогою низькочастотного генератора сигналів ГЗ-112 задавалася вхідна частота п'єзотрансформатора. Контроль частоти здійснювався частотоміром ЧЗ-34. Напряга на вході вимірювалася вольтметром В7-35. Вихідна напряга вимірювалася за допомогою кіловольметра С196. Як навантаження використовувався опір в діапазоні від 15 до 150 МОм.

На початку експерименту досліджувався окремо взятий п'єзоелектричний трансформатор для встановлення резонансних частот. Результати досліджень приведені в таблицях 2.13 - 2.22.

Таблиця 2.13 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=15 \text{ МОм}$ (ПТ №1)

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	$f_{\text{вх}}, \text{ кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{ В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	100
3	44,5	600
3	44,6	700
3	44,65	800
3	44,72	800
3	44,8	900
3	45	800
3	45,2	250
3	45,5	100

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	$f_{\text{вх}}, \text{ кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{ В}$
3	45,8	50
3	46	20
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	85	0
3	90	250
3	90,5	800
3	90,8	1000
3	91,08	1100
3	92	250
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.14 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=15 \text{ МОм}$ (ПТ №2)

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	$f_{\text{вх}}, \text{ кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{ В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	100
3	44,5	200
3	44,8	250
3	45	800
3	45,5	300
3	46	100
3	46,5	0
3	50	0

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	$f_{\text{вх}}, \text{ кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{ В}$
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	88	100
3	88,5	150
3	89	350
3	89,5	800
3	90,4	1800
3	91	1000
3	92	200
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.15 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=30$ МОм (ПТ №1)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	100
3	44,5	1000
3	44,6	1200
3	44,65	1500
3	44,72	1500
3	44,8	1800
3	45	1700
3	45,2	1000
3	45,5	400

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	45,8	100
3	46	60
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	85	0
3	90	400
3	90,5	1000
3	90,8	1800
3	91,18	2000
3	92	900
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.16 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=30$ МОм (ПТ №2)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	100
3	44,5	200
3	44,8	700
3	45	1500

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	45,5	1000
3	46	200
3	46,5	50
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	88	100
3	88,5	150

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	89	400
3	89,5	800
3	90,67	2550
3	91	2000
3	92	500
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.17 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=60$ МОм (ПТ №1)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	90
3	44,5	1000
3	44,6	1700
3	44,65	2000
3	44,72	2150
3	44,81	2400
3	45	2250
3	45,2	1800
3	45,5	800
3	45,8	180

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	46	90
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	85	0
3	90	500
3	90,5	1000
3	90,8	2000
3	91,37	2200
3	92	1050
3	92,5	400
3	93	50
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.18 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=60$ МОм (ПТ №2)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	100
3	44,5	200
3	44,8	700
3	45	1900
3	45,5	1500
3	46	400
3	46,5	50
3	50	0

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	70	0
3	80	0
3	88	100
3	88,5	150
3	89	400
3	89,5	800
3	90,88	2900
3	91	2700
3	92	700
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.19 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=100$ МОм (ПТ №1)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	200
3	44,5	1000
3	44,6	1800
3	44,65	2150
3	44,72	2150
3	44,81	2500
3	45	2550
3	45,2	2000
3	45,5	500
3	45,8	180

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	46	90
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	85	0
3	90	500
3	90,5	900
3	90,8	1800
3	91,49	2500
3	92	1800
3	92,5	400
3	93	50
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.20 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=100$ МОм (ПТ №2)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	100
3	44,5	200
3	44,8	800
3	45	2300
3	45,5	1800
3	46	400
3	46,5	50
3	50	0

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	70	0
3	80	0
3	88	100
3	88,5	150
3	89	400
3	89,5	800
3	90,88	3000
3	91	2800
3	92	700
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.21 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=150$ МОм (ПТ №1)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	200
3	44,5	1200
3	44,6	2000
3	44,65	2150
3	44,72	2400
3	44,81	2600
3	45	2150
3	45,2	1800
3	45,5	500
3	45,8	180

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	46	90
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	85	0
3	90	500
3	90,5	1050
3	90,8	2000
3	91,37	2500
3	92	1000
3	92,5	200
3	93	50
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.22 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=150$ МОм (ПТ №2)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	200
3	44,5	500
3	44,8	1000
3	45	2550
3	45,5	1500
3	46	250
3	46,5	50
3	50	0
3	60	0

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	70	0
3	80	0
3	88	100
3	88,5	150
3	89	500
3	89,5	800
3	90,75	3000
3	91	2300
3	91,5	1100
3	92	400
3	92,5	100
3	93	50
3	95	0
3	100	0

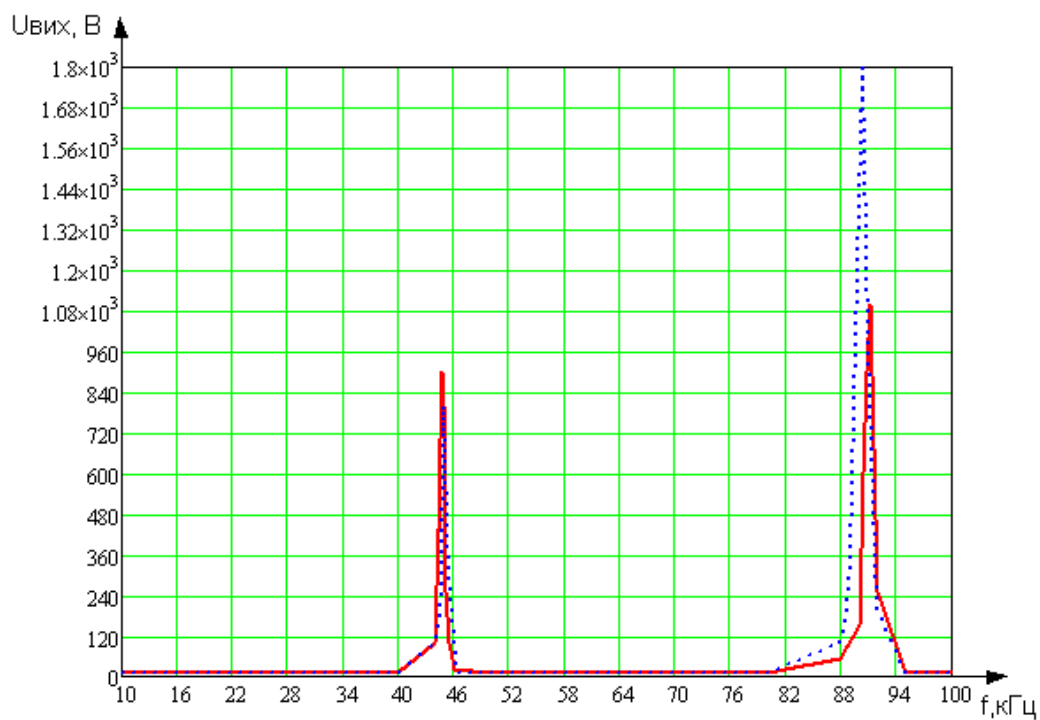


Рисунок 2.35 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=15 \text{ МОм}$

— ПТ №1
 ПТ №2

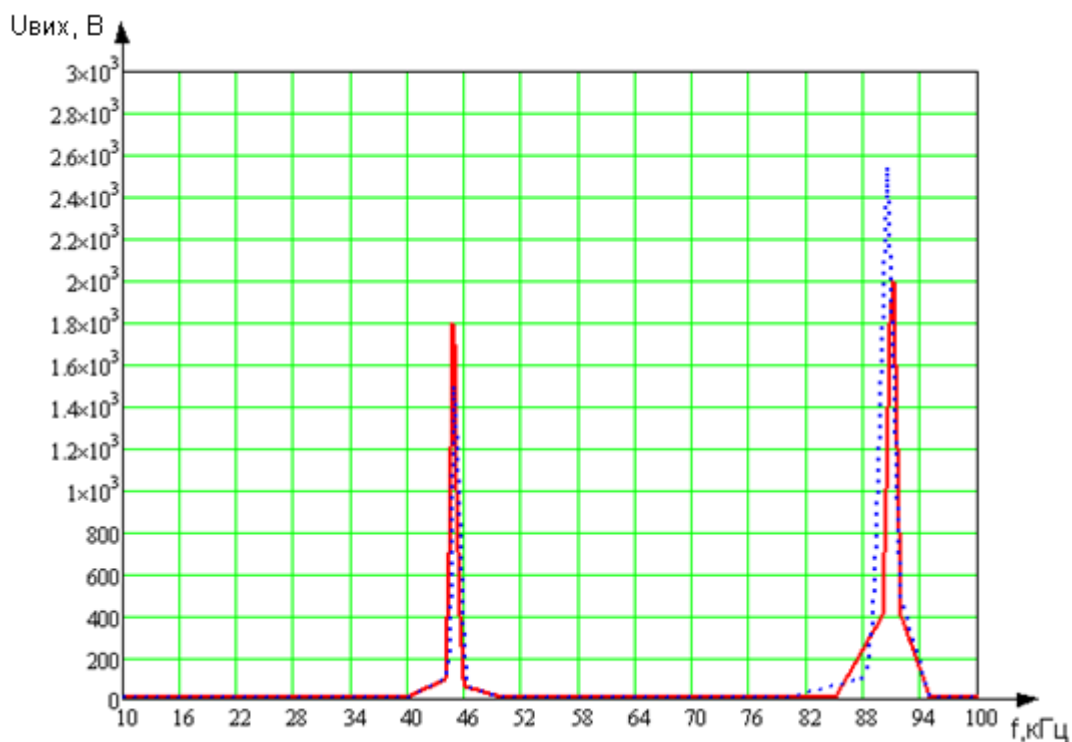


Рисунок 2.36 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=30 \text{ МОм}$

— ПТ №1
 ПТ №2

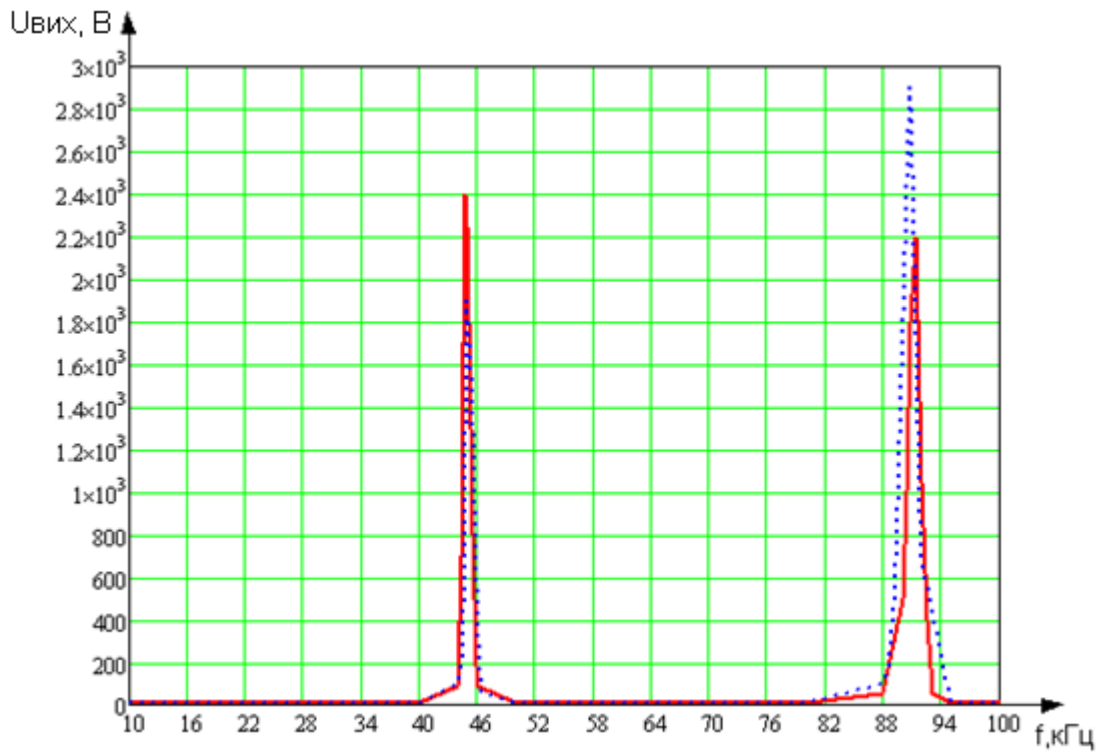


Рисунок 2.37 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=60 \text{ МОм}$

— PT №1
 PT №2

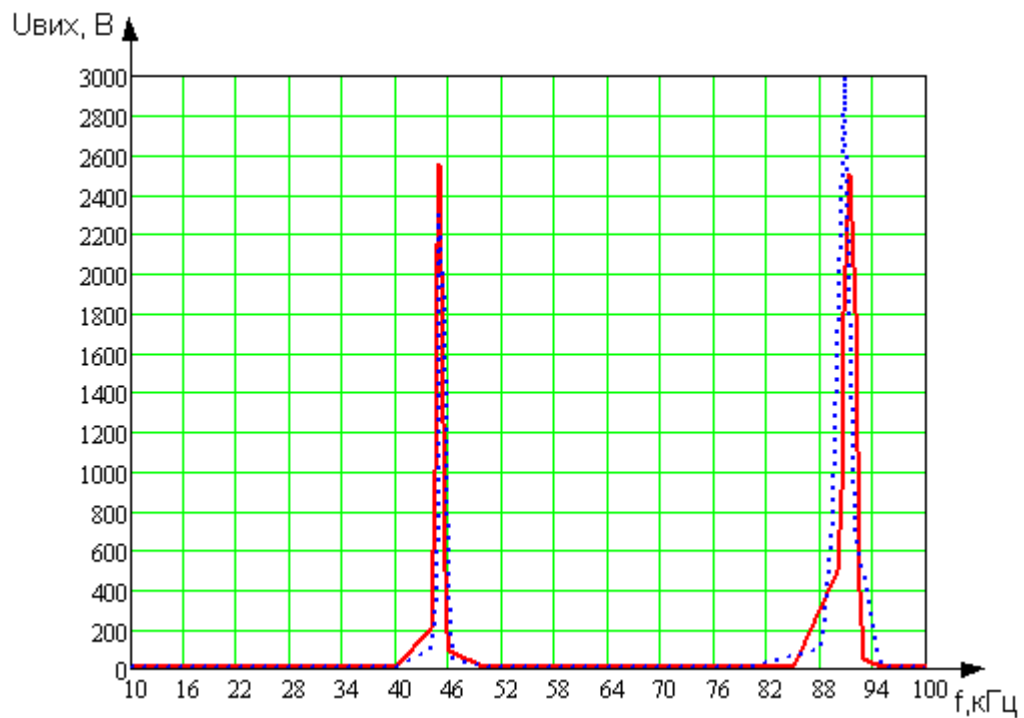


Рисунок 2.38 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=100 \text{ МОм}$

— PT №1
 PT №2

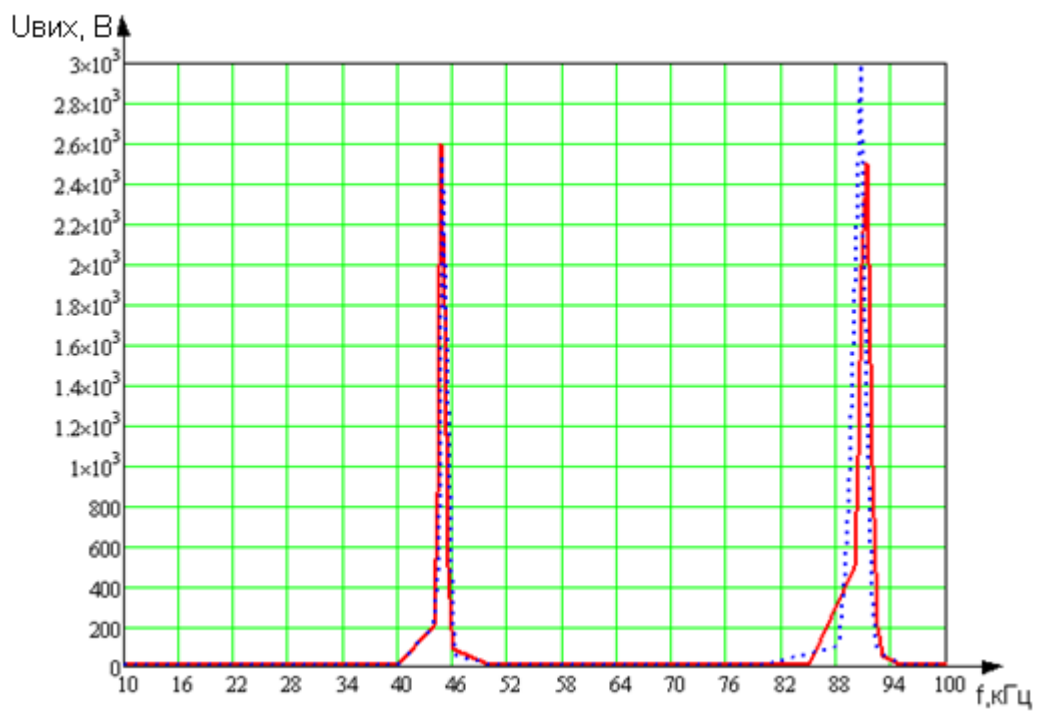


Рисунок 2.39 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при $R_{\text{н}}=150 \text{ МОм}$

— ПТ №1
 ПТ №2

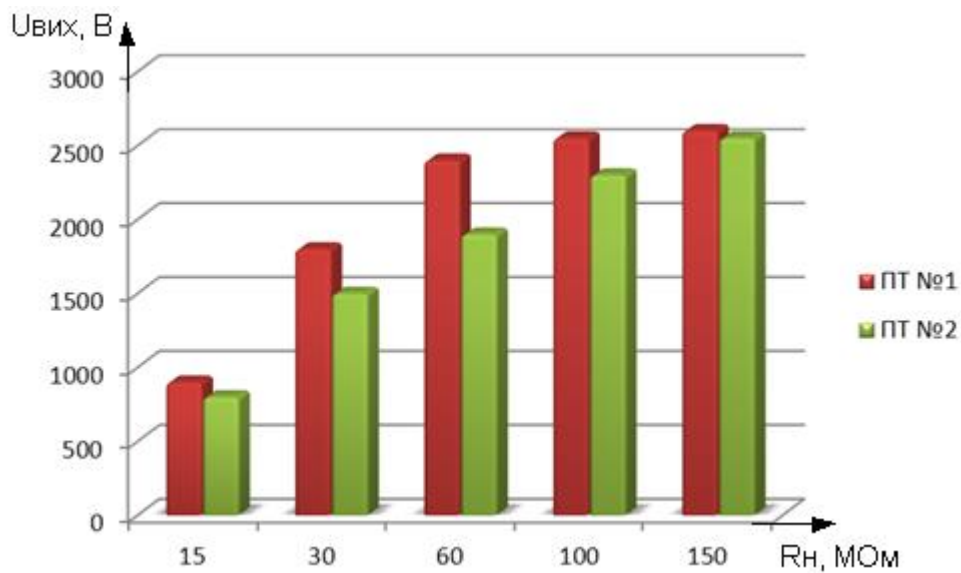


Рисунок 2.40 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $R_{\text{н}}$ для 1-ої моди

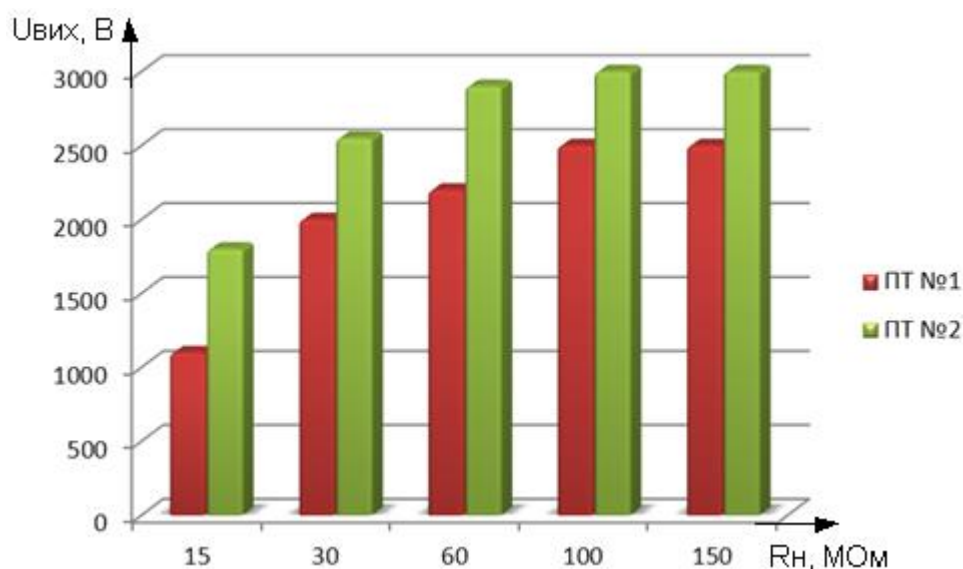


Рисунок 2.41 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від R_n для 2-ої моди

З малюнків 2.35-2.39 видно, що ПТ №1 і ПТ №2 мають власну резонансну частоту відмінну одна від одної, при цьому, вихідна напруга першого п'єзотрансформатора для першої моди коливань перевищує вихідну напругу другого ПТ, у відмінності від результатів отриманих для 2-ої моди коливань, коли $U_{\text{вих}}^{\text{ПТ №2}} > U_{\text{вих}}^{\text{ПТ №1}}$ (рисунок 2.40-2.41). На рисунках 2.42-2.43 показана залежність вихідного струму від опору навантаження для першої та другої моди коливань.

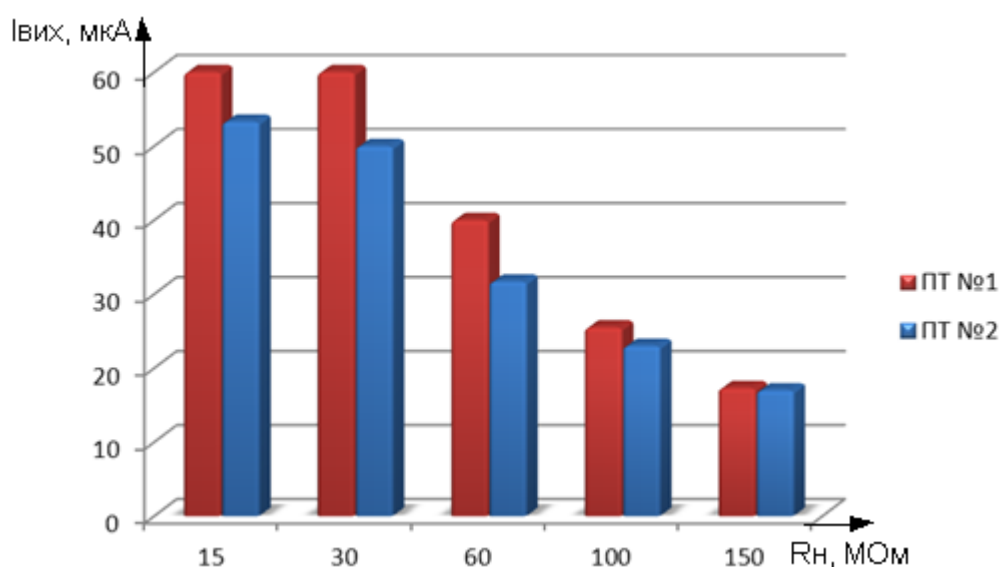


Рисунок 2.42 – Залежність $I_{\text{вих}}$ від R_n для 1-ої моди

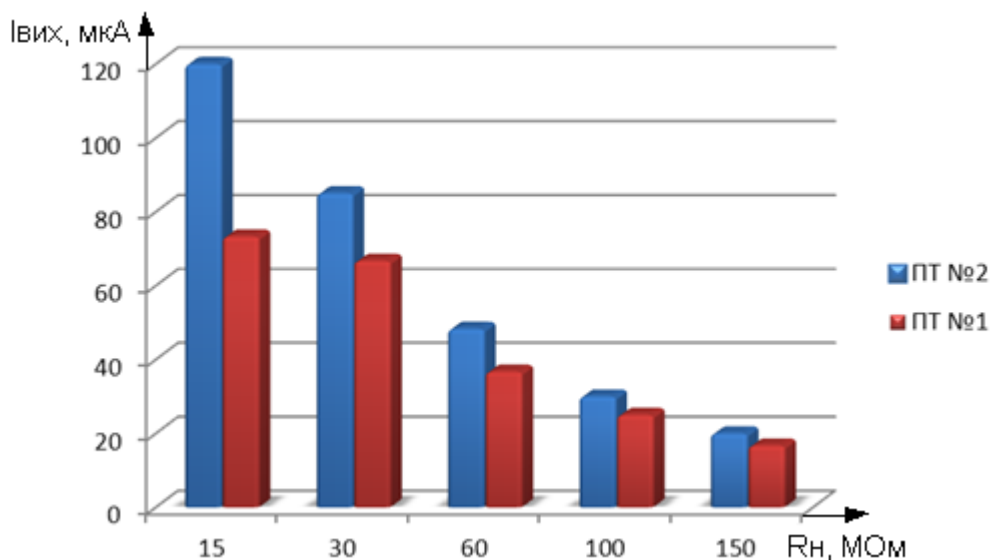


Рисунок 2.43 – Залежність $I_{вих}$ від R_n для 2-ої моди

З рисунку 2.42, 2.43 видно, що максимальне значення вихідного струму досягається при опорі навантаження 15 МОм, на частоті другої моди коливань. Тому для підвищення ефективності, при паралельному і послідовному включенні п'єзотрансформаторів, слід застосовувати опір навантаження вказаного номінала. В таблицях 2.23-2.26 будуть приведені результати паралельного і послідовного включення п'єзотрансформаторів, що отримані в ході експерименту.

Таблиця 2.23 – Залежність $U_{вих}$ від $f_{вх}$ при послідовному включенні ($R_n=150$ МОм)

$U_{вх}$, В	$f_{вх}$, кГц	$U_{вих}$, В
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	500
3	44,5	1000
3	44,8	2000
3	45	2300
3	45,55	4400
3	46	2600
3	46,5	1000

$U_{вх}$, В	$f_{вх}$, кГц	$U_{вих}$, В
3	47	400
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	88	400
3	89	800
3	89,5	1200
3	91	4000
3	92	2900
3	94	400
3	100	0

Таблиця 2.24 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при послідовному включенні ($R_{\text{н}}=15 \text{ МОм}$)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	200
3	44,5	450
3	44,8	650
3	45	1000
3	45,5	1700
3	46	400
3	46,5	50

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	47	0
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	88	0
3	89	150
3	89,5	800
3	90,4	2900
3	92	400
3	95	0
3	100	0

Таблиця 2.25 - Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при паралельному включенні ($R_{\text{н}}=150 \text{ МОм}$)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	200
3	44,5	300
3	44,8	700
3	45	1100
3	45,5	2700
3	46	1100
3	46,5	300
3	47	100

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	88	100
3	89	400
3	89,5	800
3	90,8	3100
3	91	2400
3	92	800
3	94	200
3	100	0

Таблиця 2.26 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при паралельному включенні ($R_{\text{н}}=15 \text{ МОм}$)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	10	0
3	20	0
3	30	0
3	35	0
3	40	0
3	44	100
3	44,5	200
3	44,8	250
3	45	700
3	45,5	800
3	46	250
3	46,5	100
3	47	50

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$f_{\text{вх}}, \text{кГц}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
3	50	0
3	60	0
3	70	0
3	80	0
3	88	100
3	89	300
3	89,5	700
3	90,4	1500
3	91	700
3	92	100
3	94	0
3	100	0

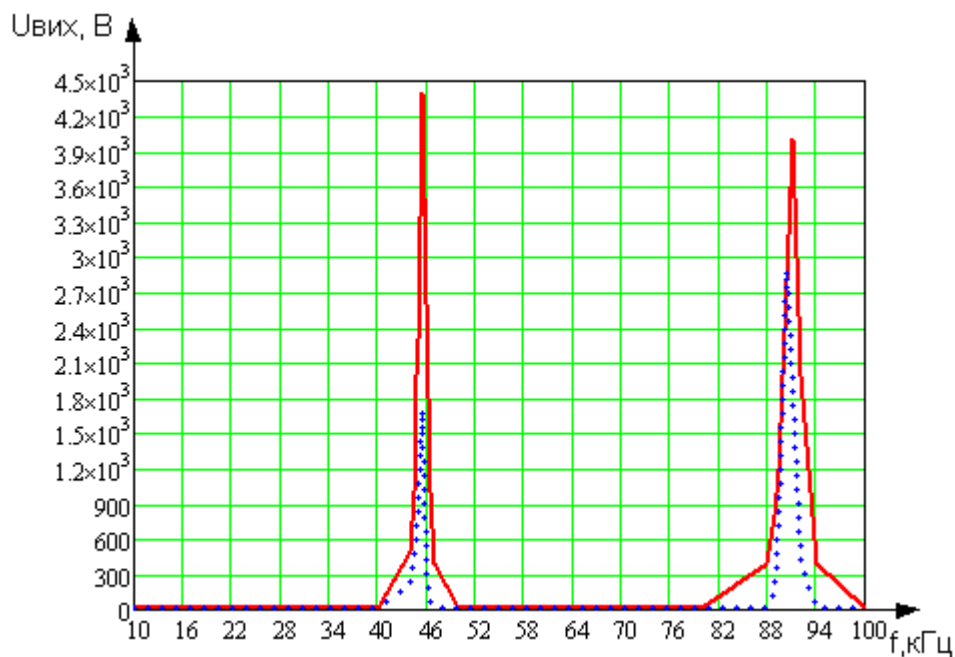


Рисунок 2.44 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при послідовному включенні

— $R_H=150 \text{ МОм}$
 $R_H=15 \text{ МОм}$

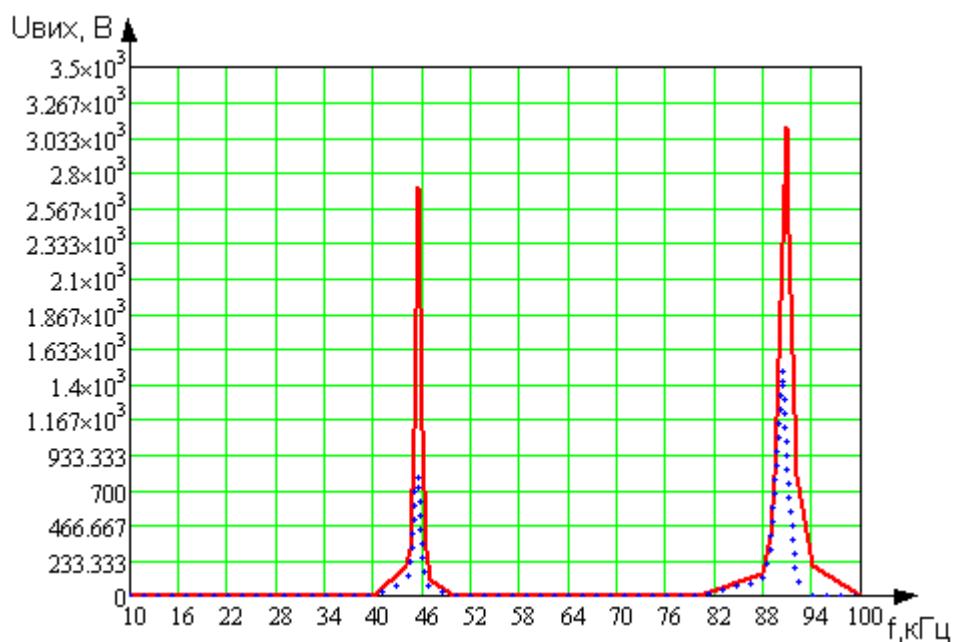


Рисунок 2.45 – Залежність $U_{\text{вих}}$ від $f_{\text{вх}}$ при паралельному включенні

— $R_H=150 \text{ МОм}$
 $R_H=15 \text{ МОм}$

В результаті дослідженні окремо взятого п'єзотрансформатора, а також паралельно і послідовно включених ПТ, з опором навантаження $R_H=15 \text{ МОм}$ і $R_H=150 \text{ МОм}$ (рисунок 2.35, 2.39), були встановлені значення частот резонансу.

Таблиця 2.27 – Значення резонансної частоти за результатами експерименту

R_H , МОм	$f_{\text{рез}}^{\text{ПТ №1}}$, кГц		$f_{\text{рез}}^{\text{ПТ №2}}$, кГц		$f_{\text{рез}}$ при послідовному включенні, кГц		$f_{\text{рез}}$ при паралельному включенні, кГц	
	1-я мода	2-я мода	1-я мода	2-я мода	1-я мода	2-я мода	1-я мода	2-я мода
15	44,8	91,08	45	90,4	45,5	90,4	45,5	90,4
150	44,81	91,37	45	90,75	45,55	91	45,5	90,8

Як видно з таблиці 2.27, при включенні двох п'єзоелектричних трансформаторів (паралельно або послідовно), результуюча частота основного резонансу склала 45,5 кГц.

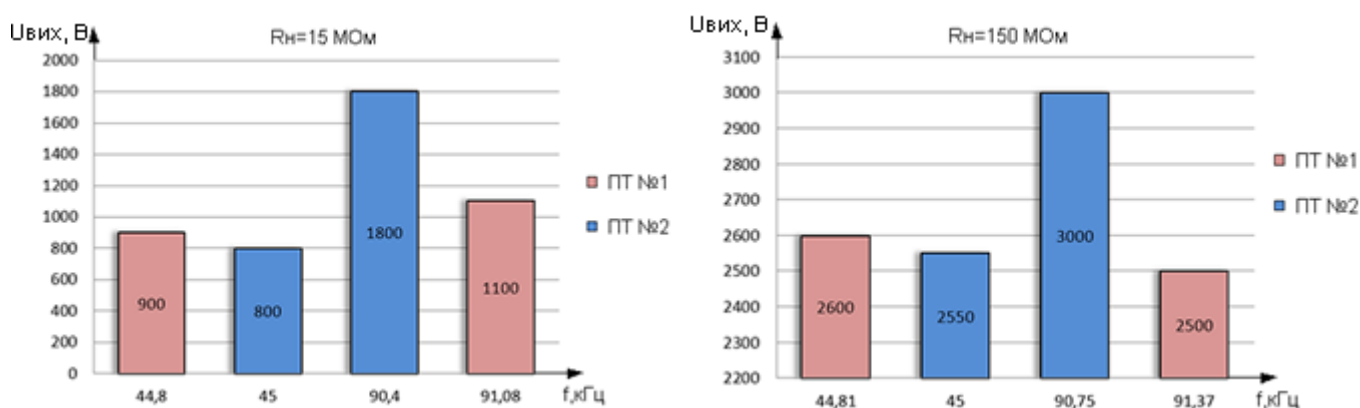


Рисунок 2.46 – Вихідна напруга ПТ №1 і ПТ №2 на частоті резонансу 1-ої та 2-ої моди коливань

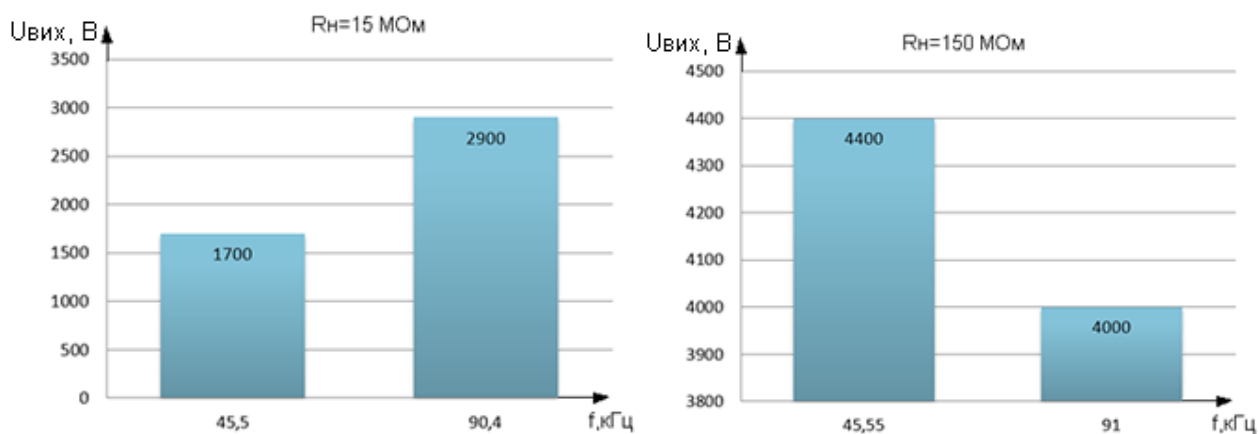


Рисунок 2.47 - $U_{\text{вих}}$ послідовно включених ПТ №1 і ПТ №2 на частоті резонансу 1-ої та 2-ої моди коливань

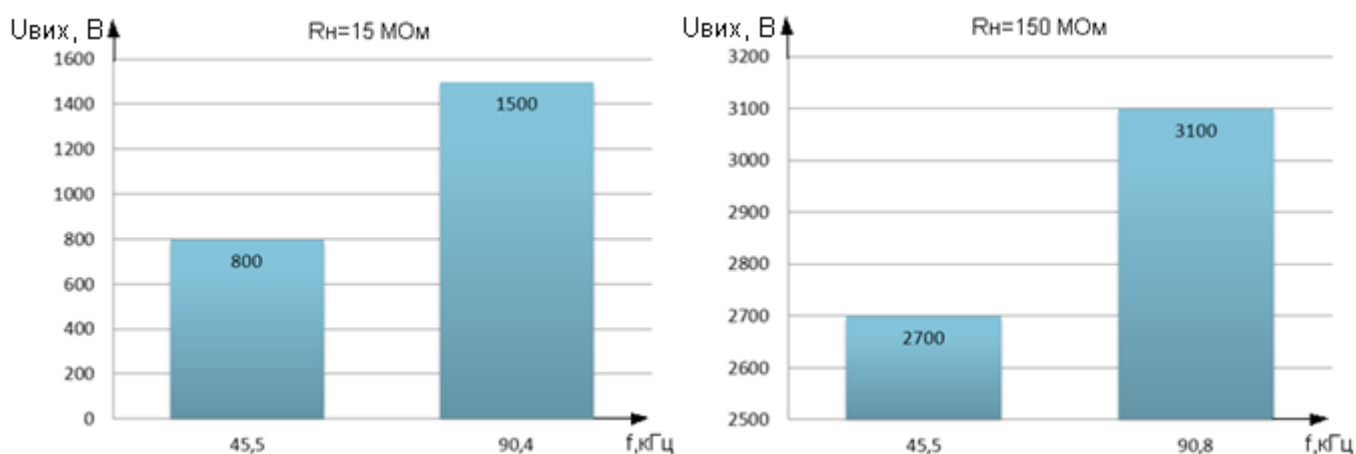


Рисунок 2.48 – $U_{\text{вих}}$ паралельно включених ПТ №1 і ПТ №2 на частоті резонансу 1-ої і 2-ої моди коливань

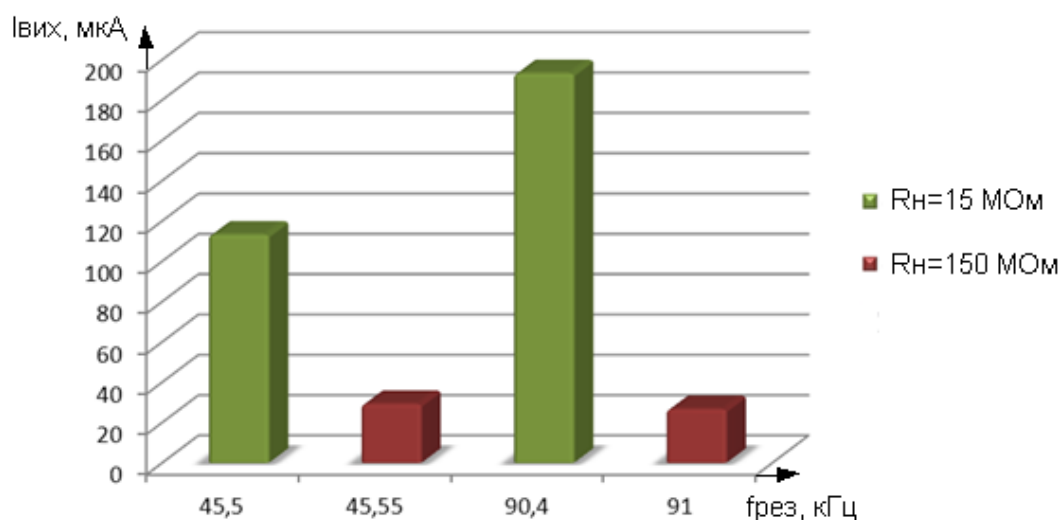


Рисунок 2.49 – Вихідний струм двох послідовно включених ПТ

Як бачимо з рисунка 2.49, найбільше значення вихідного струму ($I_{\text{вих}}=193,3$ мкА) було отримане на частоті резонансу другої моди коливань, при використанні опору навантаження номіналом 15 МОм. Таким чином, послідовне включення п'єзоелектричних трансформаторів дозволяє отримати приріст вихідної напруги (приблизно у два рази), що в свою чергу призводить до збільшення струму в навантаженні (рисунок 2.47, 2.49). При паралельному ж включенні, явного збільшення вихідної напруги не спостерігається. Проте як було вже сказано, паралельне включення п'єзоелектричних трансформаторів повинне збільшити їх здатність до навантаження, тобто отримати більший вихідний струм.

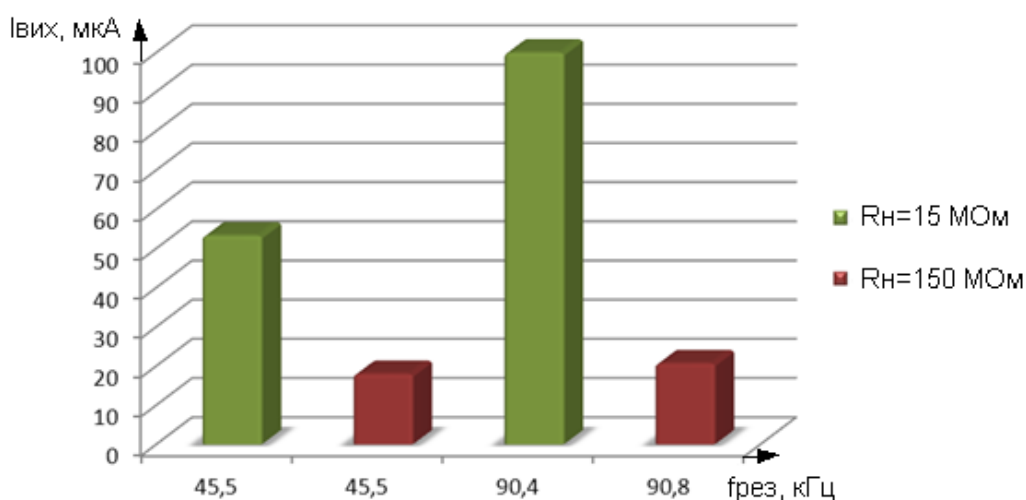


Рисунок 2.50 – Вихідний струм двох паралельно включених ПТ

При паралельному включенні двох п'єзотрансформаторів, вихідна напруга виявилася приблизно рівною вихідній напрузі одного з ПТ. За даними, отриманими в результаті експерименту, був побудований графік вихідного струму (рисунок 2.50). У свою чергу, відмітимо, що на розподіл струму може впливати вихідна напруга окремо взятого ПТ, так, наприклад, при паралельному включенні електромагнітних трансформаторів, існує умова рівності номінальної первинної та вторинної напруги (допускається різниця коефіцієнтів трансформації не більше $\pm 0,5$ %). Інакше, між паралельно включеними трансформаторами виникає зрівняльний струм, обумовлений різницею вторинної напруги трансформаторів. У свою чергу кожен з трансформаторів виявиться нерівномірно навантаженим. Тому, при паралельному включенні, рекомендується використати п'єзотрансформатори одного типу, вихідна напруга яких приблизно однакова.

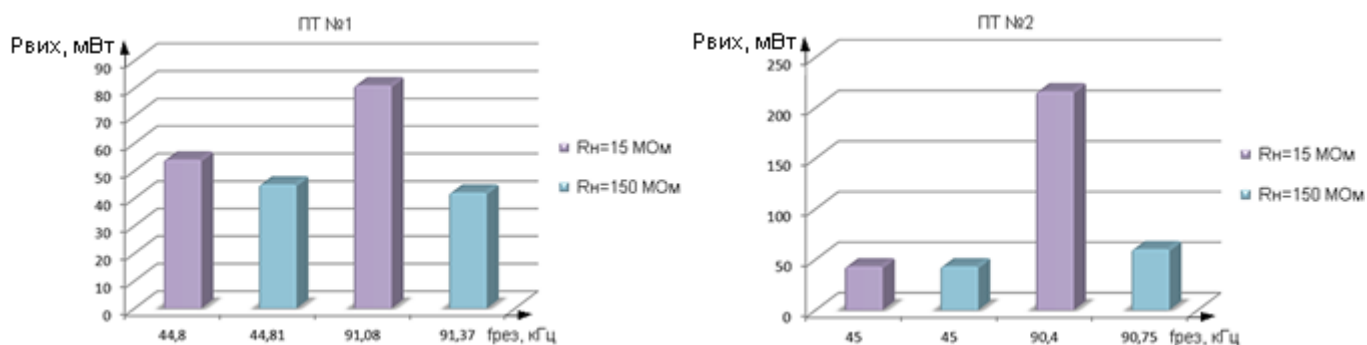


Рисунок 2.51 – Вихідна потужність ТТ №1 і ТТ №2

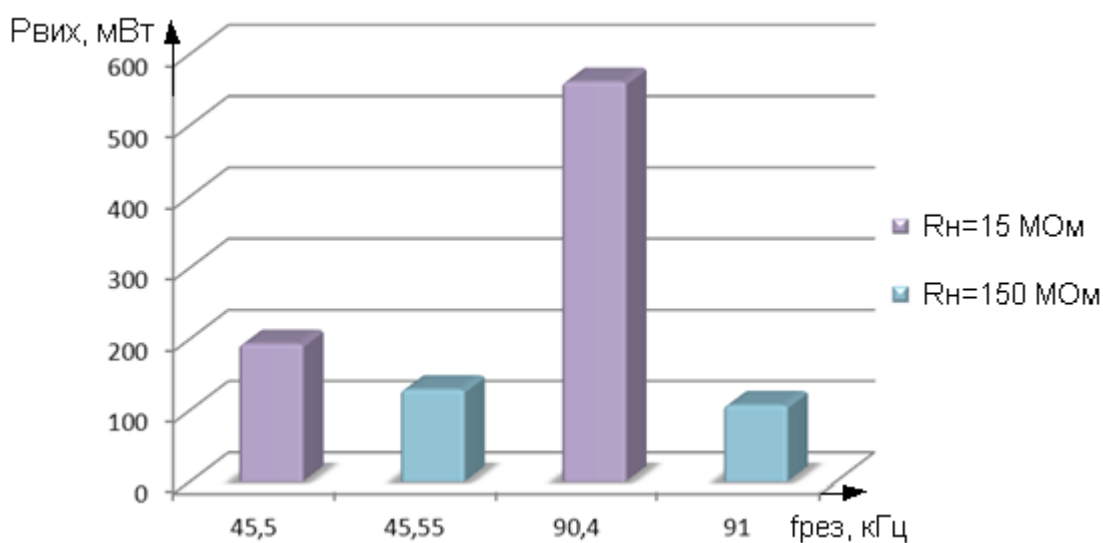


Рисунок 2.52 – Вихідна потужність двох послідовно включених ТТ

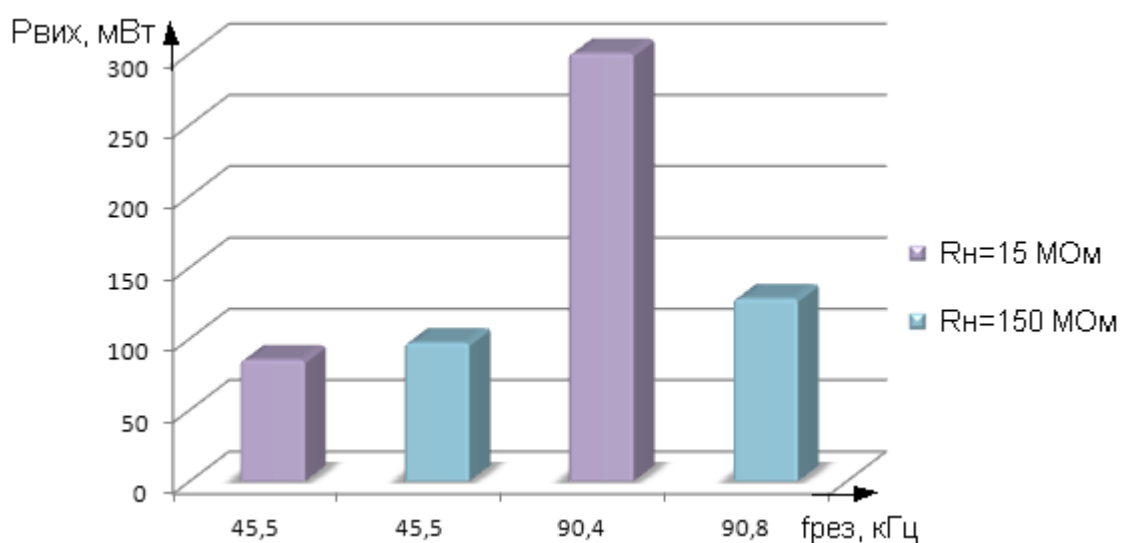


Рисунок 2.53 – Вихідна потужність двох паралельно включених ТТ

З рисунків 2.51-2.53 видно, що результуюча потужність при послідовному і паралельному включенні перевищує вихідну потужність окремо взятого п'єзотрансформатора. Також результати експерименту показали, що $P_{\text{вих}}$ трансформаторів включених послідовно перевищує $P_{\text{вих}}$ включених паралельно. Причиною тому може служити розбіжність резонансних частот, а також вплив ПТ один на одного.

2.4 Висновки.

У цьому розділі було проведено експериментальне дослідження для визначення залежності вихідної напруги, а також поведінки резонансної частоти від навантаження п'єзотрансформатора.

Проведений аналіз показав, що коефіцієнт трансформації має максимальне значення на резонансних частотах, а резонансна частота трохи зменшується при збільшенні опору навантаження. При цьому значення вихідної напруги зі збільшенням опору навантаження збільшується. Отже, можна зробити висновок, що для ефективності роботи ПТ частота джерела збудження має бути близька до однієї з резонансних частот механічних коливань.

Також була розглянута можливість підвищення ефективності використання п'єзотрансформаторів шляхом паралельного і послідовного їх включення.

В ході експерименту були отримані основні характеристики п'єзотрансформаторів, а саме: залежність вихідної напруги від частоти, залежність вихідної напруги від опору навантаження, побудовані графіки вихідного струму і вихідної потужності як окремо взятого трансформатора, так і при включенні їх послідовно або паралельно. Дослідження окремо взятого зразка показало, що резонансні частоти ПТ №1 і ПТ №2 відмінні одна від одної. Вихідна напруга першого зразка на частоті резонансу першої моди коливань перевищує вихідну напругу

другого зразка ($U_{\text{ВИХ}}^{\text{ПТ №1}} > U_{\text{ВИХ}}^{\text{ПТ №2}}$), проте для частоти резонансу другої моди коливань $U_{\text{ВИХ}}^{\text{ПТ №2}} > U_{\text{ВИХ}}^{\text{ПТ №1}}$.

При дослідженні послідовно і паралельно включених п'єзотрансформаторів, було встановлено, що результуюча резонансна частота відмінна від отриманих при дослідженні окремо взятого трансформатора. За результатами вимірів послідовно включених ПТ №1 і ПТ №2 при $R_{\text{н}}=150 \text{ МОм}$, було помічено, що на частоті резонансу другої моди коливань амплітуда вихідної напруги набула меншого значення в порівнянні з вихідною напругою на частоті резонансу першої моди коливань. Оскільки в цьому експерименті використовувалися високовольтні діоди КЦ 106-Г з $f_{\text{max}}=50 \text{ кГц}$, то причиною такої поведінки може служити обмеження по частоті ($f_{\text{max}} < f_{\text{рез}}$).

Було встановлено, що послідовне включення двох п'єзоелектричних трансформаторів приводить до збільшення вихідної напруги, а їх паралельне включення збільшує здатність до навантаження, тобто дозволяє отримати більший вихідний струм. Також було встановлено значення опору навантаження, при якому досягається більший вихідний струм ($R_{\text{н}}=15 \text{ МОм}$). Результати експерименту показали, що гранична вихідна потужність п'єзотрансформаторів включених послідовно перевищує граничну вихідну потужність п'єзотрансформаторів включених паралельно. Було також проведено моделювання, яке підтверджує ефект від послідовного і паралельного включення.

Таким чином, враховуючи вищесказане, можна зробити висновок, що усунення в деякій мірі недоліку п'єзоелектричних трансформаторів, а саме їх невисоку вихідну потужність, можливо при використанні способів їх послідовного і паралельного включення. При цьому необхідно звертати увагу на розбіжність резонансних частот та вибирати п'єзотрансформатори з мінімальною їх розбіжністю.

РОЗДІЛ 3

ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РОБОТУ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Вплив температури й старіння на опір ПТ.

З точки зору температурної залежності опору, п'єзотрансформатори можна розділити на дві групи. Для однієї групи характерна дуже мала залежність параметрів ПТ від температури, для іншої характерна помітна зміна параметрів ПТ з підвищенням температури [22].

Для більшості типів п'єзотрансформаторів характерне збільшення опору із зростанням температури. Такий характер температурної залежності визначається впливом кріплення дротяних утримувачів та відведень до ПТ. У більшості м'яких припоїв, що містять у своєму складі свинець, в'язке тертя зростає з підвищенням температури. Якщо кріплення ПТ здійснюється у вузлових точках зміщень, що відповідають пучності механічної напруги, вплив кріплення на загасання коливань особливо помітно, отже, і більше виражена залежність опору від температури. Вплив припою на температурну залежність опору зменшують за допомогою перенесення місць кріплення дротяних утримувачів в точки з меншою механічною напругою, зменшенням доз припою або використанням припоїв з малими втратами на внутрішнє тертя і малою залежністю останніх від температури, наприклад припоїв, що не містять свинець [23].

Температурні аномалії опору також мають місце внаслідок взаємодії робочих коливань ПТ з коливаннями приєднаних до нього деталей кріплення.

Повільні зміни параметрів п'єзоелектричних трансформаторів по витіканню досить тривалого часу, що спостерігаються в процесі експлуатації або зберігання, називають старінням. Передусім, під старінням ПТ розуміють явище зміни їх частоти як основного параметра, до стабільності якого пред'являють найбільш жорсткі вимоги. З інших параметрів, найбільш схильних до змін з часом, є опір та добротність. Інші параметри і характеристики зазвичай дещо змінюються, і їх зміни зазвичай можна не брати до уваги.

Резонансна частота трансформаторів, якщо навіть зовнішні механічні дії відсутні, а температура незмінна, не залишається постійною і змінюється з часом незважаючи на відсутність помітних ушкоджень конструктивного характеру. Зміна частоти в часі спостерігається незалежно від того, чи здійснює він коливання або знаходиться у спокої. Як правило, зміни частоти спочатку після виготовлення виявляються більше, ніж у подальший час. Настає момент, коли частота досягає майже постійного значення, що зберігається впродовж подальшого часу.

Зміни частоти п'єзоелектричних трансформаторів в перші тижні або місяці після виготовлення виявляються помітно більше, ніж у подальший час, наприклад через рік після виготовлення. Старіння істотно залежить від зовнішніх дій, особливо від температури, і помітно зростає з її підвищенням. Характеристики старіння або частотно-тимчасові характеристики (ЧТХ) залежать також від рівня збудження, характеру й інтенсивності інших зовнішніх дій [16]. На ЧТХ можна виділити дві області: початкову, таку, що характеризується значними змінами частоти, і що встановилася, для якої характерні помітно менші зміни частоти та постійна швидкість її зміни. Початкова область ЧТХ зазвичай визначається декількома днями, тижнями або місяцями і може істотно розрізнятися у ПТ різних типів величиною і характером зміни частоти. На рисунку 3.1 показані типові ЧТХ п'єзотрансформаторів, з яких дві мають монотонний характер, а дві інші характеризуються зміною знаків змін частоти, наприклад, частота спочатку може підвищуватися, а потім знижуватися або навпаки [22].

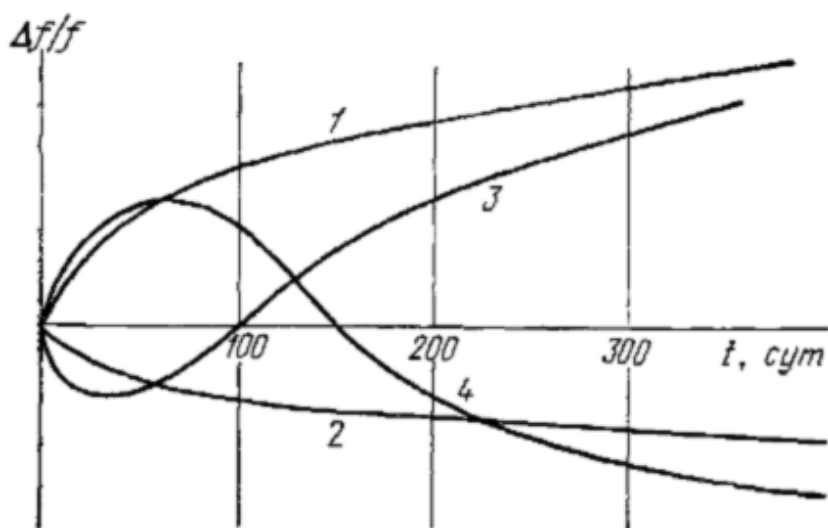


Рисунок 3.1 - Частотно-часові характеристики ПТ
(характеристики старіння)

Порядок змін частоти внаслідок старіння може бути істотно різним для ПТ з різних п'єзоелектриків, конструкцій, технології виготовлення та призначення. Довготривалу нестабільність частоти, обумовлену старінням і визначувану за тривалий час, не слід плутати з короткочасною нестабільністю частоти, спостережуваної за час порядку декількох секунд або хвилин і обумовленої шумами самого трансформатора.

Старіння – складний процес, обумовлений впливом багатьох конструктивних і технологічних чинників, виділити з яких в кожному випадку що визначають хід ЧТХ важко. Деякі чинники однаково впливають на частоту, інші ж роблять протилежний вплив, чим і пояснюється відмінність знаків зміни частоти ЧТХ. Дуже мале старіння окремих п'єзоелектричних трансформаторів пояснюється компенсацією, обумовленою чинниками, що діють на частоту протилежно один одному.

Старіння представляє деякий процес стабілізації стану коливальної системи ПТ, при якому багато чинників, що визначають старіння, приходять в рівноважний стан. Наприклад, поверхня кристалічного елемента, порушена процесами механічної обробки, є джерелом внутрішньої напруги, яка повільно зменшується внаслідок релаксації. Нанесені на поверхню ПТ електроди також є причиною виникнення напруги в ньому, яка в результаті процесів, що відбуваються в електродному шарі (рекристиалізація, дифузія), релаксують і змінюються, викликаючи зміну частоти ПТ.

Знак зміни частоти при старінні залежить в цьому випадку від того, збільшується або зменшується маса продуктів на поверхні ПТ. Наприклад, пониження частоти часто є наслідком осадження на ПТ різних забруднень.

Кріплення ПТ викликає в останньому механічну напругу, тому різні зміни в кріпленні, зухвалі зміни механічної напруги в ПТ, приводять і до зміни частоти п'єзоелектричного трансформатора. Припої та клеї, за допомогою яких здійснюється кріплення ПТ, не є матеріалами з дуже стабільними в часі механічними властивостями й кріплення ПТ, таким чином, вносить свій вклад в старіння п'єзотрансформатора. Слід мати на увазі, що всілякі зовнішні дії (теплові, механічні) можуть порушувати рівноважний стан коливальної системи ПТ, після чого хід кривої старіння може істотно змінюватися. Це пояснюється тим, що деякі визначальні

старіння чинники досягають свого рівноважного стану швидко, інші ж вимагають для цього тривалішого часу.

Характеристики старіння п'єзоелектричних трансформаторів однакового типу можуть розрізнятися у різних виробників не лише за величиною, але й по знаку зміни частоти. Це пояснюється відмінностями в технології та стані технологічної дисципліни.

Підприємства-виробники зобов'язані вести систематичні випробування п'єзотрансформаторів як на прискорене, так і на природне старіння в нормальних умовах (у режимах зберігання та роботи). Для зменшення старіння та забезпечення гарантій на старіння виробники зазвичай здійснюють прискорене старіння [24].

3.2 Вплив механічних сил.

Якби п'єзоелектричні трансформатори представляли ідеальні лінійні пристрої, то ні зовнішні, ні внутрішні механічні сили не впливали б на частоту та інші їх параметри. Досвід показує, що різні силові дії, яким ПТ піддаються в процесі виробництва, транспортування, випробувань, викликають зміни частоти під час дії. Інтенсивні дії викликають і безповоротні зміни частоти, які можуть перевищувати задані норми.

На відміну від інших пасивних компонентів ПТ мають обмежену механічну міцність, обумовлену особливостями кріплення. Підвищенню механічної міцності п'єзотрансформаторів постійно приділяється велика увага і основні успіхи в цьому напрямку досягнуті на шляху їх мініатюризації.

Вважається, що головною причиною впливу механічних сил на частоту є нелінійність пружних властивостей п'єзоелектрика. Зміни частоти ПТ викликають як різні за характером зовнішні сили, так і внутрішні сили (напруга), що виникають в п'єзоелементі. Визначальний частоту ПТ п'єзоелемент завжди перебуває під впливом як зовнішніх сил, так і внутрішньої напруги. Навіть коли п'єзотрансформатор знаходиться у спокої, на нього діють сили тяжіння та атмосферний тиск. Внутрішня

напруга – чинник, що постійно діє на п'єзоелемент. Є декілька головних причин, що їх, що викликають.

Зовнішні сили можуть бути постійними (як сила тяжіння), такими, що повільно міняються в часі, періодичними (вібрації), імпульсними та ін. Класифікація зовнішніх механічних дій стандартизована.

Внутрішня напруга в п'єзоелементі та деталях, які слід розглядати як частину його коливальної системи, мають наступне походження:

- напруга в п'єзоелектрику, що виникає при зростанні кристалів або спіканні п'єзокерамики;
- напруга переважно в поверхневих шарах п'єзоелемента (ПЕ), обумовлені операціями механічної і термічної обробки;
- напруга контактного походження, викликана нанесенням на поверхні ПЕ плівкових покриттів (електроди, контактні майданчики та ін.);
- напруга в приєднаних елементах (утримувачі).

Вплив зовнішніх сил на частоту п'єзоелемента оцінюють величиною силового коефіцієнта частоти (СКЧ) - відношення зміни частоти на одиницю сили. Силовий ефект став предметом детальних досліджень, у результаті яких були встановлені основні його закономірності. Зміни частоти пропорційні силам, що діють на п'єзоелемент, змінюють знак при зміні напрямку сили на протилежний, а також залежать від напрямку сили відносно осей кристала. Сила, діючи у різних напрямках відносно кристалографічних осей, викликає зміни частоти різної величини і різних знаків. Існують напрямки, по яких дія сили не викликає змін частоти (нульовий СКЧ), та, навпаки, є напрямки найбільшої силової чутливості. Результати цих досліджень дозволили розробникам створити стійкіші до дії сил ПТ, а також новий клас чутливих до механічних дій, відомих як п'єзорезонансні датчики механічних величин [16].

Зміни частоти залежно від інтенсивності механічних дій можуть носити як зворотний, так і незворотний характер. В останньому випадку зміни частоти обумовлені або залишковими деформаціями системи кріплення, внаслідок яких змінюється жорсткість приєднаних до кристала елементів, або залишковою механічною напругою в п'єзоелементі.

Зміни частоти п'єзотрансформатора відповідають характеру зміни інтенсивності і частоти зовнішньої дії. Величина зворотних змін частоти залежить від напрямку зовнішньої дії. Змінюючи положення п'єзотрансформатора відносно напрямку зовнішньої дії, можна визначити напрямки мінімальних та максимальних змін частоти [22]. За наявності досить чутливої частотно вимірювальної апаратури можна встановити, що відносні зміни частоти ПТ мають порядок $10^{-8} \dots 10^{-9}$ залежно від положення у просторі відносно напрямку сили тяжіння.

3.3 Вплив технологічного розкиду параметрів.

Оскільки резонансна частота знаходиться у вузькому діапазоні, то при проектуванні джерел живлення (ДЖ) на базі п'єзоелектричних трансформаторів повинна дотримуватися певна точність. Причиною неефективної роботи таких ДЖ може служити технологічний розкид як самого п'єзотрансформатора, так і інтегральних мікросхем які знаходяться у складі системи керування. Розкид параметрів ПТ полягає у відхиленні габаритних розмірів від стандартної величини, значень електрофізичних параметрів, а також в електричному та механічному старінні п'єзокераміки [25]. У зв'язку з цим, змінюється резонансна частота п'єзотрансформатора. Розглянемо вплив технологічного розкиду параметрів при послідовному з'єднанні п'єзотрансформаторів. Припустимо що в одного з ПТ є відхилення габаритних розмірів. Значення габаритних розмірів з урахуванням відхилень приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення габаритних розмірів п'єзотрансформатора [19]

Тип	Кіл-ть шарів	Матеріал виготовлення	Геометричні розміри		
			Довжина L', L'' , мм	Ширина В, мм	Товщина Н, мм
ТП-Р1 801403	Одношарий	ЦТС-24	42	13,6	2,8

Таблиця 3.2 – Розрахункові параметри еквівалентної схеми другого ПТ

C_{e1} , пФ	C_{e2} , пФ	K_1	$1/K_2$	L, Гн	C_M , пФ	R_M , Ом	L_M , Гн
1493,878	4,903	0,204	28,836	3,074	1426,16	14,092	0,011

Розрахункові параметри еквівалентної схеми першого ПТ приведені в таблиці 2.10.

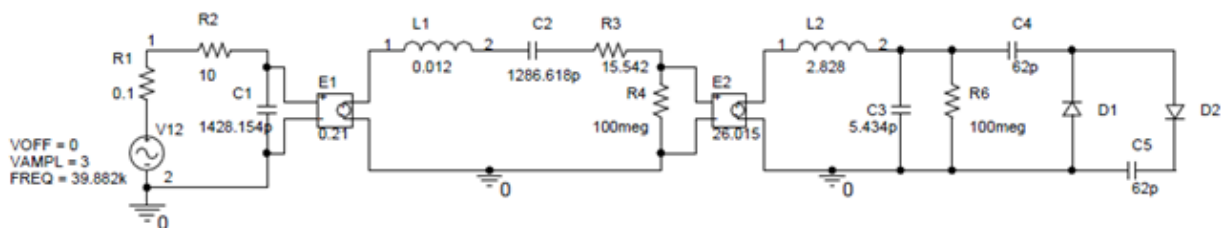


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема першого ПТ в OrCAD

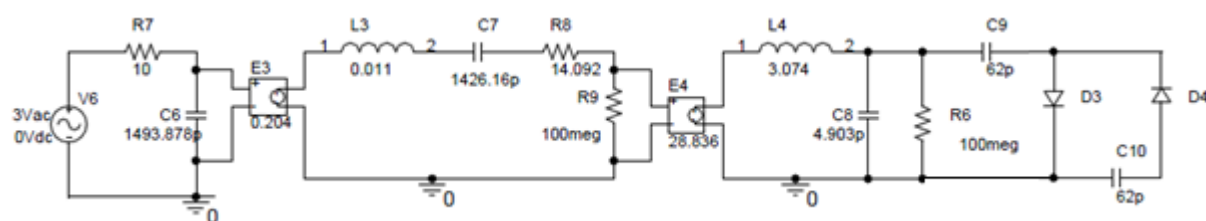


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема другого ПТ в OrCAD

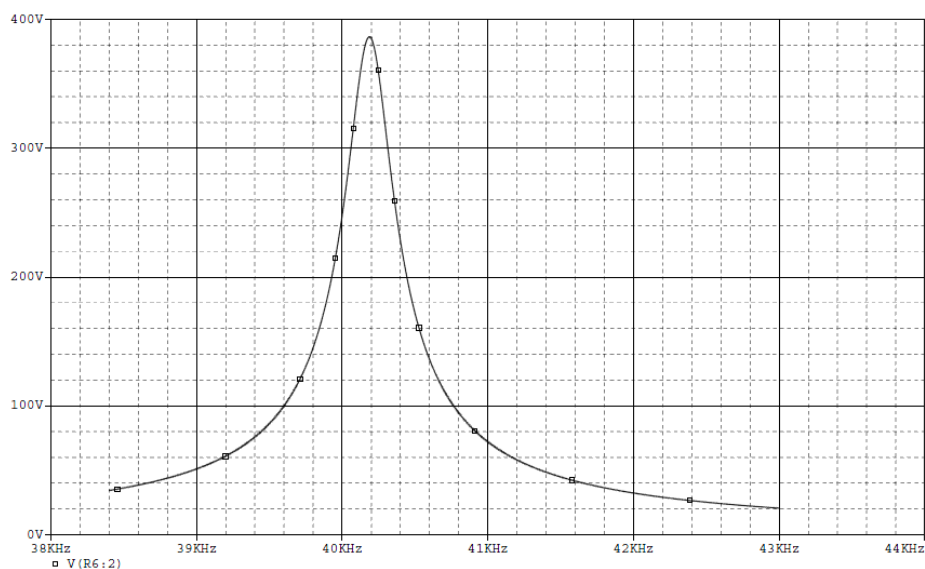


Рисунок 3.4 – АЧХ другого ПТ

Резонансна частота склала 40,2 кГц. Амплітуда вихідної напруги показана на рисунку 3.5.

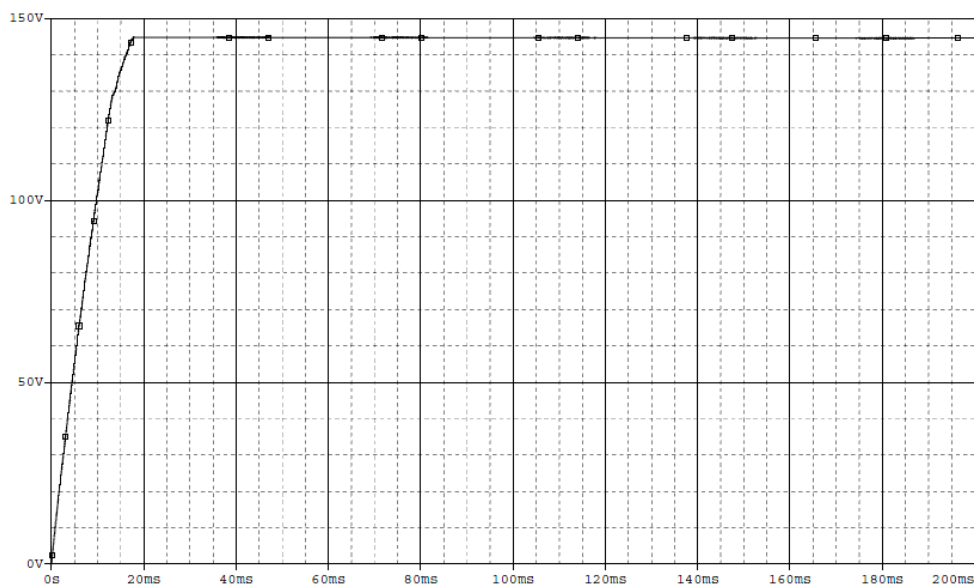


Рисунок 3.5 – Вихідна напруга другого ПТ при $f=40,2$ кГц

Як видно з рисунка 3.5 амплітуда вихідної напруги другого ПТ склала 144,7 В. Резонансна частота першого ПТ складає 39,882 кГц, а вихідна напруга при цьому складає 141,6 В. Якщо врахувати, що генератор вхідного сигналу є загальним для двох п'єзотрансформаторів, можна припустити, що вихідна напруга двох послідовно сполучених ПТ, в силу розбіжності резонансних частот, набуде деякого значення. Таке значення буде меншим за величиною, ніж $U_{\text{вих}}$, отримане за умови $f_{\text{рез}}^{\text{ПТ №1}} = f_{\text{рез}}^{\text{ПТ №2}}$.

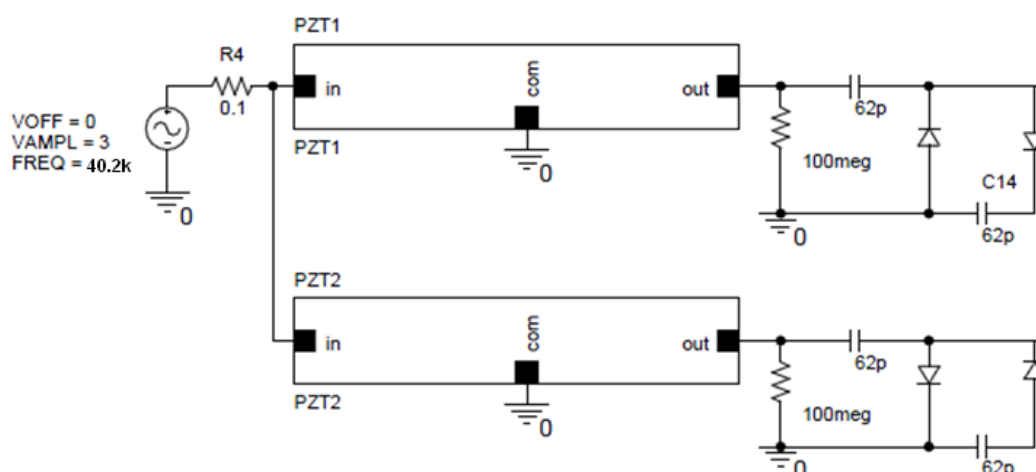


Рисунок 3.6 – PSpice-модель послідовного з'єднання двох ПТ у вигляді ієрархічних блоків

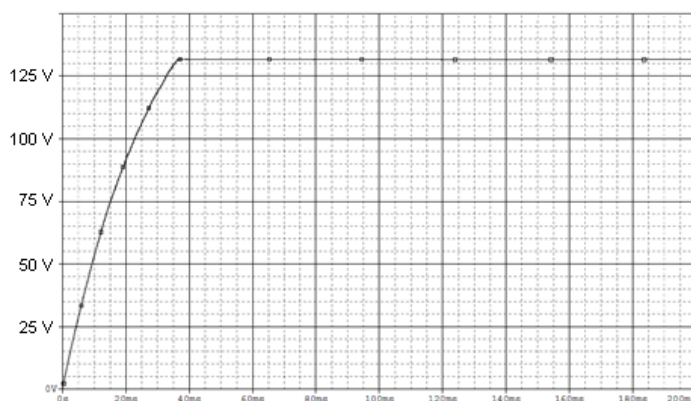


Рисунок 3.7 – Вихідна напруга двох послідовно з'єднаних ПТ на частоті 40,2 кГц

З рисунка 3.7 видно, що результуюча напруга знизилася, і склала 132 В. Причиною такої поведінки може служити розбіжність резонансних частот внаслідок взаємного впливу послідовно сполучених п'єзотрансформаторів. Оптимальним варіантом є пошук результуючої частоти резонансу, при якій вихідна напруга набуде максимального значення.

3.4 Можливість автоматичного забезпечення роботи ПТ в області резонансної частоти.

Деякі особливості роботи п'єзоелектричних трансформаторів, при використанні їх в електронних схемах, створюють деякі труднощі. АЧХ п'єзотрансформатора властивий резонансний характер, тому доцільним є використання ПТ саме на резонансній частоті або поблизу неї.

Приклад найпростішого джерела живлення на базі п'єзотрансформатора зображений на рисунку 3.8.

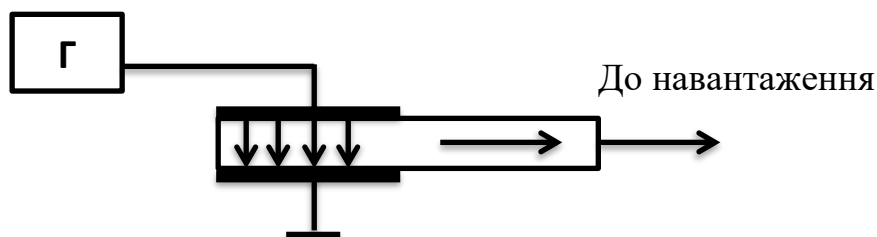


Рисунок 3.8 – Найпростіше джерело живлення на базі ПТ

Частота генератора (Γ) в такому ДЖ, має бути налаштована на резонансну частоту п'єзотрансформатора. Така схема є дуже простою, але має істотний недолік: відсутність контролю та стабілізації вихідної напруги. Якщо поглянути на АЧХ ПТ, то стає зрозуміло, що незначна зміна частоти вхідного сигналу приведе до істотного зменшення вихідної напруги. Зміна частоти на вході п'єзотрансформатора, обумовлене нестабільною роботою генератора, є не єдиною причиною зменшення вихідної напруги. До таких також можна віднести і дрейф амплітудно-частотної характеристики п'єзоелектричного трансформатора внаслідок впливу різних чинників : температура, вологість, вібрації і так далі.

З усього вищесказаного виходить, що для забезпечення стабільної роботи джерела живлення, спроектованого на базі п'єзотрансформатора, потрібне введення додаткових вузлів контролю та стабілізації частоти. Для забезпечення стабілізації вихідної напруги на необхідному рівні необхідно контролювати один або декілька параметрів ПТ. До таких параметрів можна віднести саму вихідну напругу, вхідний і вихідний струм, а також фазове зрушення між напругою і струмом ПТ. Найчастіше здійснюють контроль вихідної напруги, після чого система керування автоматично регулює частоту вхідного сигналу. Приклад структурної схеми ДЖ на базі п'єзотрансформатора з частотним керуванням та зворотним зв'язком по напрузі зображений на рисунку 3.9.

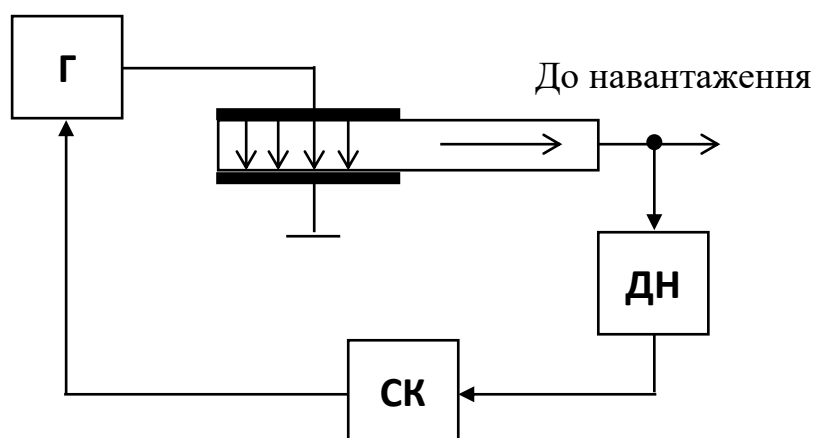


Рисунок 3.9 – Структурна схема джерела живлення з частотним управлінням і контролем вихідної напруги

За допомогою датчика напруги (ДН) здійснюється контроль вихідної напруги, залежно від якої система керування (СК) подає керуючий сигнал на генератор (Г). Таким чином, здійснюється підстроювання частоти вхідного сигналу залежно від вихідної напруги. Проте при використанні п'єзотрансформатора в режимі холостого ходу, наприклад в іонізаторах повітря, такий спосіб контролю і управління неможливий. В цьому випадку доцільно контролювати не вихідні, а вхідні параметри п'єзотрансформатора. Одним з таких способів є контроль вхідного струму ($I_{вх}$) ПТ. На рисунку 3.10 приведена теоретична залежність вхідного струму п'єзотрансформатора (червона лінія) від частоти, а також залежність вихідної напруги ($U_{вих}$) від частоти (чорна лінія) [26].

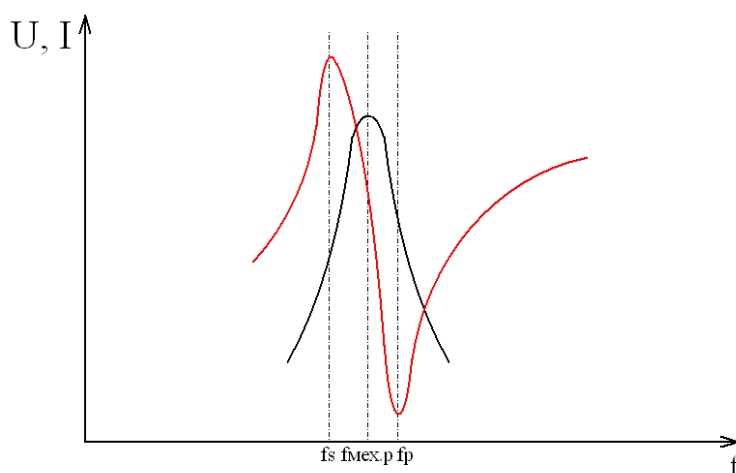


Рисунок 3.10 – Залежність вхідного струму та вихідної напруги від частоти

Частоти f_s і f_p є резонансними та антирезонансними відповідно (мається на увазі електричний резонанс вхідного кола ПТ), а частота $f_{мех.р}$ називається частотою механічного резонансу і відповідає максимуму вихідної напруги ПТ. Таким чином, використовуючи датчик струму у вхідному колі п'єзотрансформатора та систему керування, здатну відстежити максимум (чи заздалегідь задане значення) вхідного струму ПТ й підлаштувати частоту генератора, можна побудувати високовольтне джерело живлення із стабілізацією вихідної напруги п'єзотрансформатора. Структурна схема такого джерела живлення показана на рисунку 3.11.

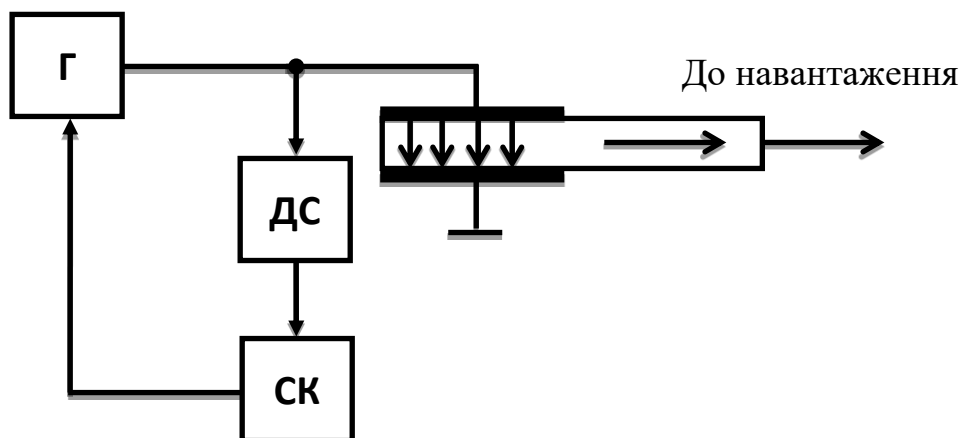


Рисунок 3.11 – Структурна схема джерела живлення з частотним управлінням та контролем вхідного струму

Такий спосіб стабілізації вихідної напруги за допомогою датчика вхідного струму (ДС) є найбільш універсальним, т.я в цьому випадку можлива робота п'єзотрансформатора в режимі холостого ходу.

Система керування, як в першому, так і в другому випадку, повинна сканувати певний діапазон частот до визначення резонансу. При чому робити це треба безперервно через вплив зовнішніх чинників (температура, вібрації і т.д) на резонансну частоту. Таку функцію можуть виконувати сучасні мікроконтролери. Роль генератора також може виконувати сам мікроконтролер [27].

3.5 Висновки.

У цьому розділі були розглянуті зовнішні чинники, що роблять вплив на параметри п'єзоелектричного трансформатора. Розглянуто вплив наступних чинників: температура, старіння, механічна дія. Усі вони, прямо або побічно, негативно впливають на резонансну частоту в умовах роботи п'єзоелектричного трансформатора. У свою чергу відхилення резонансної частоти призводить до зменшення вихідної напруги п'єзотрансформатора.

Було розглянуто, шляхом моделювання в САПР OrCAD, вплив технологічного розкиду параметрів п'єзотрансформатора в умовах їх послідовного включення.

Розкид параметрів полягав у відхиленні геометричних розмірів трансформатора, що у свою чергу вплинуло на розрахункові параметри еквівалентної схеми ПТ, а отже і на частоту резонансу. Було встановлено, що при послідовному включенні двох п'єзотрансформаторів, що мають відмінні одна від одної значення резонансних частот, результуюча вихідна напруга змінилася в меншу сторону.

Оскільки амплітудно-частотній характеристиці п'єзоелектричного трансформатора властивий резонансний характер, доцільним є використання ПТ саме на резонансній частоті або поблизу неї. Якщо вважати умови, в яких перебуває п'єзотрансформатор, ідеальними (тобто за відсутності впливу температури, вібрацій і т.д), то для стабільної роботи ПТ досить одного генератора вхідного сигналу налаштованого на певну частоту. А оскільки в реальних умовах це практично неможливо, необхідно вводити коло зворотнього зв'язку.

Для стабілізації вихідної напруги було запропоновано здійснювати контроль вихідної напруги або струму, з подальшим частотним управлінням. Ці два способи є досить ефективними, проте, застосування зворотнього зв'язку у вхідному колі шляхом виміру струму, дозволяє працювати п'єзотрансформатору в режимі холостого ходу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Curie J., Curie P. Developpement, par pression, de l'electricite polaire dans les cristaux hemiedres a faces inclinees. – «Compt. Rend.», 1880, 91, 294-295.
2. Langevin P. Precede et appareil d'emission et de reception des ondes elastiques sousmarines a l'aide des proprietes piezoelectriques du quartz. Fr. pat., 1918, № 505703.
3. Патент 439.992 США / Розен К.А. – 29.06.1954.
4. Лавриненко В.В. Пьезоэлектрические трансформаторы. – М.: Энергия, 1975. – 112 с.
5. Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике / А.А. Ерофеев, Г.А. Данов, В.Н. Фролов. – М.: Радио и связь. 1988. – 128 с.
6. Карташев И.А., Марченко Н.Б. Пьезоэлектрические трансформаторы тока. – К.: Техніка, 1978. – 176 с.
7. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова; Под ред. В.М. Шарапова. – Москва: Техносфера, 2006. – 635 с.
8. Некрасов М.М. Элементы пьезоэлектроники и возможности их применения в электронике / М.М. Некрасов, В.В. Лавриненко, А.А. Божко и др. // Электричество. – 1971. – № 12. – С. 1 – 8.
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 / В.М. Климашин, В.Г. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2006 г. – №1. – С. 56-60.
11. Alfredo Vazquez Carazo. 50 Years of Piezoelectric Transformers. Trends In The Technology. Department of R&D Engineering, Face Electronics, 2001, 14 p.
12. Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы. – Ростов-на-Дону: РГУ, 1983. – 156 с.
13. Плужников В.М., Семенов В.С. Пьезокерамические твердые схемы. – М.: Энергия, 1971. – 168 с.

14. APC International. – Режим доступа: <http://www.americanpiezo.com/>. – Заголовок з екрану. – 17.03.2013.
15. Информационные материалы компании «ZIPPY Technology Corporation». – Режим доступа: <http://www.zippy.com.tw>. – Заголовок з екрану. – 19.03.2013.
16. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
17. Хайнеман Р. PSPICE. Моделирование работы электронных схем: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 336 с.
18. Паэрэнд Ю.Э. Моделирование работы пьезоэлектрических трансформаторов / Ю.Э. Паэрэнд, Д.А. Кривошей // Труды девятой Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ – 2008). – Том 2. – Одесса: ДП Нептун – Технология, 2008. – С. 33.
19. Витебский завод радиодеталей «Монолит». – Режим доступа: <http://www.monolit.by/>. – Заголовок з екрану. – 26.03.2013.
20. Джагупов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник. – СПб.: Политехника, 1994. – 608 с.
21. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1996. – 580 с.
22. Пьезоэлектрические резонаторы: Справочник / В.Г. Андросова, Е.Г. Бронникова, А.М. Васильев и др.; Под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Позднякова. – М.: Радио и связь, 1992. – 392 с.
23. Ильичев В. А. Температурная зависимость динамических параметров кварцевых резонаторов//Электронная техника. Сер. 10. — 1972. — Вып. 3. — С. 45—53.
24. Гильварг Б. А., Ливенский Г. А. О влиянии режима испытаний на величину старения кварцевых резонаторов//Электронная техника. Сер. 9. — 1970. — Вып. 5. — С. 12.—17.

25. Ланин В.А. Старение пьезокерамики системы ЦТС под действием электрических и механических напряжений: Автореф. канд. техн. наук: 01.04.07 / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Томск, 2006. – 21 с.

26. Михайлюченко О.В. Разработка и исследование схем включения пьезоэлектрических трансформаторов // Квалификационная работа магистра. – 2007. – 76 с.

27. Медведев А., Кисляков А. Высоковольтный источник питания на пьезокерамическом трансформаторе / А. Медведев, А. Кисляков // Схемотехника. – 2002. – №7. – С. 2.