

Міністерство освіти і науки України
Черкаський державний технологічний університет

БАЗІЛО КОСТЯНТИН ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.373.826.032:534.232.082.73

**ТЕОРІЯ ПОБУДОВИ ДИСКОВИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З РОЗДІЛЕНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ
КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ**

Спеціальність 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Черкаси – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України на кафедрі приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Петрищев Олег Миколайович,
Державне підприємство «Київський державний науково-дослідний інститут гідроапаратури»,
м. Київ, провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Єременко Володимир Станіславович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, завідувач кафедри
інформаційно-вимірювальних технологій

доктор технічних наук, професор
Нікольський Віталій Валентинович,
Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, професор кафедри технічної експлуатації судна

доктор технічних наук, професор
Ситніков Валерій Степанович,
Одеський національний політехнічний університет,
м. Одеса, завідувач кафедри комп'ютерних систем

Захист відбудеться "05" червня 2020 р. о 12⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 73.052.04 у Черкаському державному технологічному університеті за адресою: 18006, м. Черкаси, бул. Шевченка, 460.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Черкаського державного технологічного університету за адресою: 18006, м. Черкаси, бул. Шевченка, 460.

Автореферат розісланий "04" травня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю.Ю. Бондаренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стабільна робота комп'ютерних систем, особливо в галузях критичного застосування (енергетика, медицина, аерокосмічна техніка тощо), багато в чому залежить від достовірності функціонування як програмної, так і апаратної частини комп'ютерних систем. Невід'ємними елементами апаратної частини комп'ютерних систем, від характеристик яких значною мірою залежать точність і надійність їх роботи, є перетворювачі.

Серед комп'ютерних систем критичного застосування, де необхідна висока надійність, стабільність, автономність, максимальна тривалість безвідмовної роботи таких наднадійних перетворювачів є: автоматичні міжпланетні станції; автономні глибоководні плаваючі об'єкти; будь-які інші об'єкти, доступ до яких сильно утруднений, неможливий або надзвичайно небезпечний для людини (ядерні реактори; хімічно небезпечні об'єкти, станції в Антарктиді і Арктиці, підземні об'єкти, орбітальні супутники тощо).

За результатами аналізу світового ринку мікропристроїв, в основі яких лежить п'єзоефект консалтинговою компанією “Yole Développement” (Франція) було встановлено, що на сьогоднішній момент, цей ринок майже досяг відмітки 85 млн. дол. США, а вже до 2023 року – становитиме близько 310 млн. дол. США (при цьому, Compound Annual Growth Rate складатиме 30,3%).

Актуальність застосування різних функціональних елементів п'єзоелектроніки в комп'ютерних системах критичного застосування пояснюється, перш за все, їх високою надійністю, порівняною з показниками інтегральних мікросхем, а також можливістю їх мініатюризації. Беззаперечними перевагами застосування п'єзокераміки є невелика вартість сировини та технології виготовлення п'єзокерамічних елементів, відносно проста технологія виготовлення, більшість технологічних операцій якої уніфіковані з операціями технологій мікроелектроніки, висока інертність до дії кліматичних факторів зовнішнього середовища, високо стабільні показники електромеханічного коефіцієнту, електричної та механічної міцності, надвисока чутливість до зовнішніх механічних впливів тощо.

До недавнього часу науково-технічна база проектування і вдосконалення п'єзокерамічних перетворювачів обмежувалася, в основному, лише зміною форми, розмірів і матеріалу п'єзоелемента, а також виду порушуваних коливань. Існуючі підходи підвищення ефективності п'єзоелектричних перетворювачів, зокрема розширення робочого діапазону, підвищення чутливості та рівня вихідного сигналу, вимагають неминучого компромісу з вимогами до мініатюризації цих перетворювачів, забезпечення яких є особливо важливим для об'єктів критичного застосування.

Основною перевагою використання в комп'ютерних системах перетворювачів з п'єзокерамічних матеріалів обумовлюється їх особливою структурою, яка дозволяє реалізувати в одному такому елементі принципово різні схеми.

Найбільш важливими роботами в напрямі вивчення та вдосконалення п'єзоелектричних перетворювачів є дослідження зарубіжних і вітчизняних вчених, серед яких слід відзначити наступних: Джагупов Р.Г., Грінченко В.Т., Карлаш В.Л., Петрищев О.М., Савін В.Г., Улітко А.Ф., Шарапов В.М., Шульга Н.А., Аронов Б.С., Берлінкур Д.А., Ван Дайк С., Жуков В.Б., Кудрявцев Б.А., Кеді В.Г.,

Лавриненко В.В., Новацький В., Оноє М., Партон В.З., Пугачов С.І., Якименко Ю.І., Каразо А.В., Бен-Яаков С., Арнау А. та інші.

Проте, незважаючи на різноманіття проведених досліджень, аналіз існуючих підходів показує, що на сьогодні не повною мірою вирішено низку актуальних питань, пов'язаних з важливими теоретичними аспектами й практичною реалізацією високоефективних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування. Так, наразі існує наступне **протиріччя**: необхідність підвищення ефективності п'єзоелектричних перетворювачів (розширення робочого діапазону, підвищення чутливості та рівня вихідного сигналу), з одного боку, та дотримання вимог щодо мініатюризації цих перетворювачів, з іншого боку.

Подолати цю суперечність можна шляхом вирішення **актуальної науково-прикладної проблеми** створення високоефективних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування з одночасним підвищенням ступеня інтеграції та гібридизацією їх експлуатаційних властивостей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету. Дослідження пов'язані із планом науково-дослідних робіт університету, які виконувались в період 2009-2019 років при безпосередній участі автора: “Створення та дослідження мономорфних та біморфних п'єзотрансформаторів для п'єзоелектричних перетворювачів механічних величин” (№ ДР 0109U002737, 2009–2010 рр., виконавець НДР), “Створення та дослідження методів та засобів розширення робочої смуги частот п'єзоелектричних перетворювачів” (№ ДР 0111U002940, 2011–2012 рр., виконавець НДР), “Розробка нової технології проектування і створення на її основі малогабаритних низькочастотних п'єзоелектричних перетворювачів для гідроакустики, електроакустики, комп'ютерної техніки, приладобудування” (№ ДР 0113U003349, 2013–2014 рр., виконавець НДР), “Розробка високоефективних багатокомпонентних електроакустичних перетворювачів з коливальними системами різної фізичної природи” (науково-дослідна робота за грантом Президента України № Ф56/GP/F56/02-2014, 2014 р., виконавець НДР), “Створення високоефективних мономорфних п'єзоелектричних перетворювачів для електро- і гідроакустики” (№ ДР 0115U000716, 2015–2016 рр., виконавець НДР), “Створення високоефективного інтелектуального комплексу для розробки та дослідження п'єзоелектричних компонентів для приладобудування, медицини та робототехніки” (№ ДР 0117U000936, 2017 р., виконавець НДР), “Розробка мобільного високоефективного ультразвукового хірургічного інструменту для військової та цивільної медицини” (№ ДР 0117U007474, 2017–2019 рр., відповідальний виконавець НДР), “Розробка мобільного багатокомпонентного ультразвукового хірургічного інструменту з коливальними системами різної фізичної природи для військової та цивільної медицини» (науково-дослідна робота за грантом Президента України № GP/Ф75/201/2018, 2018 р., відповідальний виконавець НДР).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування шляхом створення нових та удосконалення існуючих

моделей та методів синтезу дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні *задачі*:

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми дослідження і вдосконалення дискових п'єзокерамічних перетворювачів з розділеними електродами для комп'ютерних систем критичного застосування.

2. Побудувати математичну модель п'єзокерамічного диску, що коливається в широкому діапазоні частот, та розробити на її основі метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки для побудови високоефективних комп'ютерних систем.

3. Побудувати математичні моделі п'єзоелектричного дискового перетворювача з кільцевими електродами та багатосекційного дискового п'єзоелектричного перетворювача для комп'ютерних систем критичного застосування.

4. Побудувати математичну модель п'єзокерамічного перетворювача з секторним електродуванням робочої поверхні диска, який працює на невісесиметричних планарних коливаннях, та може застосовуватися для побудови мікроелектромеханічних систем критичного застосування.

5. Побудувати математичну модель дискового п'єзоелектричного перетворювача, який працює на вісесиметричних коливаннях поперечного вигину, та може застосовуватися для побудови ультразвукових систем спеціального призначення.

6. Розробити методи модифікації п'єзоелектричних перетворювачів для побудови перетворювачів з розділеними електродами для комп'ютерних систем критичного застосування.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії в дискових п'єзоелектричних перетворювачах з розділеними електродами.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи синтезу дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач використовувалися математичні методи розв'язування диференційних рівнянь, теорія п'єзоефекту, фундаментальні принципи механіки та електродинаміки, теорія невісесиметричних планарних коливань, теорії поперечного вигину круглих пластин, методи управління характеристиками п'єзоелектричних перетворювачів, метод визначення матеріальних констант п'єзокераміки, аналітичні методи скануючої АСМ, метод комбінованого електронно-променевого модифікування поверхні, теорія планування експерименту і комп'ютерного моделювання для експериментальної перевірки коректності математичних моделей і результатів теоретичних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Удосконалено математичну модель електричного імпедансу коливального п'єзокерамічного диску, що коливається в широкому діапазоні частот, та на цій основі розроблено метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, який, на відміну від відомих методів, дозволяє в рамках одного експерименту визначити три модуля пружності, два п'єзомодулі і одне значення діелектричної проникності для отримання змістовних і достовірних кількісних оцінок параметрів фізичного стану п'єзоелектричних перетворювачів.

2. Вперше побудовано математичні моделі п'єзоелектричних перетворювачів з кільцевим і дисковим електродами в первинному електричному колі та багатосекційних дискових п'єзоелектричних перетворювачів з можливістю групового включення секцій та з урахуванням негативного зворотного електроакустичного зв'язку та значень імпедансу електричного навантаження, що розширює можливість побудови багатофункціональних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

3. Вперше побудовано математичну модель дискового п'єзоелектричного перетворювача з секторними електродами, що містить мінімальне число спрощуючих реальну ситуацію припущень, і дозволяє виконувати прогнозування характеристик перетворювача, який працює на невісесиметричних планарних коливаннях.

4. Удосконалено математичну модель біморфного дискового п'єзоелектричного перетворювача з симетричним електричним навантаженням у вторинному електричному колі, що, спираючись на фундаментальні принципи механіки та електродинаміки, дозволяє враховувати геометричні, фізико-механічні та електричні параметри реальної конструкції п'єзоелектричного перетворювача, принцип дії якого заснований на використанні вісесиметричних коливань поперечного вигину.

5. Отримали подальший розвиток методи модифікації дискових п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування шляхом використання поліелектродної конструкції, технології додаткових елементів, просторової енергосилової структури п'єзоелектричних перетворювачів, технології термовакуумного напилення, що забезпечує можливість синтезу таких п'єзоелектричних перетворювачів з покращеними характеристиками.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження становлять наукову основу для технічної реалізації та впровадження у виробництво та навчальний процес методичного, математичного та технічного забезпечення процесу проектування перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування на основі п'єзоелектричних елементів з розділеними електродами. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

– розроблені методи та моделі, схемні та конструктивні рішення розширили науково-технічну базу проектування дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами для комп'ютерних систем критичного застосування;

– розроблено метод проведення та обробки результатів експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки (спосіб визначення фізико-механічних констант п'єзокерамічних матеріалів захищений патентом України на корисну модель № 119993), що дозволило отримати змістовні і достовірні кількісні оцінки параметрів фізичного стану п'єзоелектричних елементів та підвищити точність їх характеристик у 2-2,5 рази;

– створено алгоритм та програмно реалізовано математичні моделі дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, що дозволило оцінювати характеристики п'єзоелектричних перетворювачів з урахуванням негативного зворотного електроакустичного зв'язку та значень імпедансу електричного навантаження, які раніше не враховувалися, та зменшити відносну похибку на 2 – 3%;

– запропоновано нові схемотехнічні рішення п'єзоелектричних перетворювачів поліелектродної конструкції (трансформаторного типу) з використанням технології додаткових елементів та просторової енергосилової структури (п'єзоелектричні перетворювачі захищені патентами України на корисну модель №№ 67640, 97752), використання яких дозволило підвищити рівень вихідного сигналу на 15-20 дБ порівняно з перетворювачами, побудованими за традиційною схемою;

– отримано зразки дискових п'єзоелектричних перетворювачів з нанесеними методом термовакуумного напилення струмопровідними електродами, якість та експлуатаційні характеристики яких підтверджено методом АСМ.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, а також розроблене методичне та технічне забезпечення знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах ПрАТ “Укрп’єзо” (м. Черкаси), ТОВ “Лілея” (м. Київ) та ПП “Сенсорна електроніка” (м. Черкаси).

Використання технологічних рекомендацій та розроблених методів експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, енергосилового методу синтезу п'єзоелектричних перетворювачів, технології додаткових елементів, побудованих математичних моделей розроблених п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами дозволило покращити технічні характеристики, зменшити кількість натурних експериментів, скоротити час і вартість розробки нових моделей п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, а також отримати річний економічний ефект 250 тис. гривень. Вартість зекономлених ресурсів становить комерційну ціну математичної моделі.

Отримані у дисертаційній роботі результати використовуються у навчальному процесі при читанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять, виконанні курсових та дипломних проектів з дисциплін "Спеціальні технології виробництва приладів", "Методологія наукових досліджень", "Процеси та обладнання мікротехніки", "Діагностика та надійність автоматизованих систем", "Основи моделювання технічних систем", "Проектування електромеханічних вузлів робототехнічних систем", "Механічні, електричні та магнітні вимірювання", "Автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи" у НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" та Черкаському державному технологічному університеті (підтверджено актами впровадження).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві здобувачем розроблено комплекс моделей дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами та багатосекційних дискових п'єзоелектричних перетворювачів з можливістю групового включення секцій з урахуванням негативного зворотного електроакустичного зв'язку [1–4, 6, 8, 10, 20, 22, 23, 25, 46, 50], метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки [5, 7, 53], удосконалено методи модифікації дискових п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування шляхом використання поліелектродної конструкції [31–36, 39–44],

технології додаткових елементів [26–28, 37, 38], просторової енергосилової структури п'єзоелектричних перетворювачів [29, 30, 48], технології термовакуумного напилення [19], досліджено методом атомно-силової мікроскопії поверхні п'єзоелектричних перетворювачів [15, 47], що забезпечує можливість синтезу п'єзоелектричних перетворювачів з покращеними характеристиками та побудови багатофункціональних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

В патентах [54–60] автору належать ідеї та конструктивні рішення щодо покращення технічних характеристик п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами.

Особистий внесок здобувача у наукових працях, написаних у співавторстві, зазначений у списку опублікованих праць за темою дисертації та відповідає темі та змісту дисертації.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Матеріали, основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і опубліковані у збірках доповідей та матеріалів науково-технічних конференцій, семінарів, симпозіумів, а саме: Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми інформатизації” (м. Черкаси, 2014–2015, 2019 рр.); науково-технічній конференції “Фізика, електроніка, електротехніка” (м. Суми, 2015–2016 рр.); науково-технічній конференції “Інформатика, математика, автоматика” (м. Суми, 2017–2018 рр.); International Scientific Conference “Environmental Engineering ENVIRO” (Vilnius, Lithuania, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи” (Лазурне, 2017–2019 рр.); International Scientific Conference “Machines. Technologies. Materials” (Sofia, Bulgaria, 2018); International Scientific Conference “Mathematical Modeling” (Sofia, Bulgaria, 2018); International Scientific Congress “Innovations” (Sofia, Bulgaria, 2019). Матеріали дисертаційного дослідження доповідалися на докторальних літніх школах в рамках проекту TEMPUS NETCENG “New Model of the Third Cycle in Engineering Education Due to Bologna Process in BY, RU, UA», що проходили на базі Вільнюського технічного університету Гедиміна (Литва, 2016 р.) та Берлінського технічного університету (Німеччина, 2017 р.).

Публікації. Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 60 наукових працях, у тому числі 2 монографіях, 35 статтях у наукових фахових виданнях (з них 4 статті у виданнях іноземних держав, 4 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science), 8 патентах України на корисну модель, 14 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 1 статті у інших виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 432 сторінки, з них обсяг основного тексту – 310 сторінок, 125 рисунків, 21 таблиця, список використаних джерел складає 250 найменувань і займає 28 сторінок, а також 3 додатки на 39 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, розкрито наукову

новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено дані про публікації та апробацію роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз науково-прикладної проблеми, досліджено сучасний стан та вимоги до комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування. На основі аналізу визначені особливості застосування п'єзоелектричних перетворювачів в комп'ютерних системах критичного застосування та тенденції їх розвитку.

Показано, що стабільна робота комп'ютерних систем, особливо критичного застосування, багато в чому залежить від достовірності функціонування як програмної, так і апаратної частини комп'ютерних систем. Невід'ємними елементами апаратної частини комп'ютерних систем, від характеристик яких значною мірою залежать точність і надійність їх роботи, є перетворювачі.

Об'єктами, де необхідне застосування таких наднадійних перетворювачів є: автоматичні міжпланетні станції, автономні глибоководні плаваючі об'єкти, будь-які інші об'єкти, доступ до яких сильно утруднений, неможливий або надзвичайно небезпечний для людини. П'єзоелектричні матеріали завдяки своїм унікальним властивостям знаходять численні застосування в області інженерії, гідро- та електроакустики, робототехніки та медицини.

До недавнього часу науково-технічна база проектування і вдосконалення п'єзокерамічних перетворювачів обмежувалася, в основному, лише зміною форми, розмірів і матеріалу п'єзоелемента, а також виду порушуваних коливань. Існуючі підходи підвищення ефективності п'єзоелектричних перетворювачів, зокрема розширення робочого діапазону, підвищення чутливості та рівня вихідного сигналу п'єзоелектричних перетворювачів, вимагають неминучого компромісу з вимогами до мініатюризації цих перетворювачів, забезпечення яких є особливо важливим для об'єктів критичного застосування.

Відмічено, що останнім часом широкого поширення в елементах електронних пристроїв отримали мікроелектромеханічні системи (МЕМС), в яких, як правило, використовується часткове електродування робочих поверхонь. Часткове електродування та розділення електродів робочих поверхонь дозволяє порушувати в об'ємі п'єзоелектричних перетворювачів кілька типів пружних коливань. Маніпулюючи геометричними параметрами електродованих поверхонь, можна управляти енергетикою коливальних процесів.

Окрім того, розвиток і підвищення ефективності комп'ютерних систем критичного застосування неможливі без попереднього рішення задачі їх математичного моделювання.

На основі аналізу літературних та Internet джерел визначено, що в даний час відсутні надійні і достовірні методи побудови математичних моделей п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами для комп'ютерних систем критичного застосування, які могли б використовуватися в якості теоретичних основ розрахунку характеристик і параметрів даного класу функціональних елементів сучасної п'єзоелектроніки.

Незважаючи на різноманіття досліджень, аналіз існуючих підходів показує, що на сьогодні не повною мірою вирішено низку актуальних питань, що обумовлює необхідність вирішення актуальної науково-прикладної проблеми створення

високоєфективних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування з одночасним підвищенням ступеня інтеграції та гібридизацією експлуатаційних властивостей шляхом створення нових та удосконалення існуючих моделей та методів синтезу дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами

У другому розділі розроблено метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, без достовірних даних про які не можливе отримання змістовних і достовірних кількісних оцінок параметрів фізичного стану п'єзоелектричних перетворювачів комп'ютерних систем критичного застосування, та побудовано математичну модель електричного імпедансу п'єзокерамічного диску (1), товщина якого α в багато разів менше радіуса R , що коливається в широкому діапазоні частот. Поверхні диска $z=0$ і $z=\alpha$ (z – координатна вісь циліндричної системи координат ρ, φ, z , початок якої поєднано з центром нижньої поверхні диска) електродовані – покриті тонким (не більше 10 мкм) шаром срібла. На верхню поверхню $z=\alpha$ подається електричний потенціал $U_0 e^{i\omega t}$ (U_0 – амплітудне значення електричного потенціалу, величина котрого вибирається з умови $U_0/\alpha \ll 0,1E_0$, де $E_0 \cong 2$ МВ/м – напруженість електричного поля, яким поляризовано матеріал диска, що гарантує відсутність нелінійних ефектів; $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; ω – колова частота зміни знаку потенціалу; t – час). Нижня електродована поверхня $z=0$ заземлена, тобто має нульовий потенціал. Вираз для розрахунку електричного імпедансу коливального диска має вигляд:

$$Z_{en}(\omega) = \frac{U_0}{-i\omega C_{\theta}^{\varepsilon} \Xi^{(\varepsilon)}(\omega)}, \quad (1)$$

$$\text{де} \quad \Xi^{(\varepsilon)}(\omega) = \frac{2e_{31}\alpha}{\chi_{33}^{\varepsilon} R} u_{\rho}^{(z)}(\lambda R) + \frac{e_{33}}{\chi_{33}^{\varepsilon}} \left[u_z^{(p)}(\gamma\alpha) - u_z^{(p)}(0) \right] - U_0;$$

$C_{\theta}^{\varepsilon} = \frac{\pi R^2}{\alpha} \chi_{33}^{\varepsilon}$ – динамічна електрична ємність коливального п'єзокерамічного диску, $u_z^{(p)}(z)$ – усереднений по площі диска аксіальний компонент вектору зміщення матеріальних частинок диска; $u_{\rho}^{(z)}(\rho)$ – усереднений по товщині диска радіальний компонент вектору зміщення матеріальних частинок диска; χ_{33}^{ε} – діелектрична проникність, яка експериментально визначається в режимі сталості (рівності нулю) пружних деформацій (верхній символ ε); e_{31} , e_{33} – п'єзоелектричні модулі; $\lambda = \omega/\sqrt{c_{11}/\rho_0}$ і $\gamma = \omega/\sqrt{c_{33}^D/\rho_0}$ – хвильові числа радіальних і аксіальних (товщинних) коливань п'єзокерамічного диску відповідно; c_{11} , c_{33}^D – модулі пружності; ρ_0 – густина п'єзокераміки.

Вираз (1) справедливий в області високих частот, коли одночасно існують і радіальні і аксіальні зміщення матеріальних частинок диска, тобто коли довжина пружної хвилі стає співмірною з товщиною диска.

В області середніх і низьких частот через особливості електропружного стану коливального диска відбувається зміна числових значень динамічної електричної ємності і аналітичної конструкції $\Xi^{(\varepsilon)}(\omega)$.

В області низьких частот (діапазон частот, в якому довжина пружної хвилі

істотно (на порядок і більше) перевищує радіальний розмір R диска), коли механічні напруги в п'єзокерамічному диску практично дорівнюють нулю, а прямий п'єзоелектричний ефект практично не проявляється, електричний імпеданс коливального п'єзокерамічного диска має характер реактивного опору конденсатора з електричної ємністю $C_{\vartheta}^{\sigma} = \pi R^2 \chi_{33}^{\sigma} / \alpha$ – динамічна електрична ємність п'єзокерамічного диска, де χ_{33}^{σ} – діелектрична проникність п'єзокераміки в режимі сталості (рівності нулю) механічного напруження в об'ємі і на поверхні коливального диска. При цьому вираз (1) набирає вигляду формули для розрахунку реактивного опору електричної ємності

$$Z_{\text{ел}}(\omega) = \frac{1}{i\omega C_{\vartheta}^{\sigma}}.$$

Електричний імпеданс коливального п'єзокерамічного диска в області середніх частот (частотний діапазон, в якому довжина пружної хвилі стає порівняною з радіусом п'єзокерамічного диска) має вигляд:

$$Z_{\text{ел}}(\omega) = \frac{1}{i\omega C_{\vartheta}^*} F^{*}(\omega), \quad (2)$$

де $F^{*}(\omega) = \frac{\lambda R J_0(\lambda R) - (1-k) J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R) - (1-k - 2K_{31}^2) J_1(\lambda R)}$; $K_{31}^2 = (e_{31}^*)^2 / (c_{11} \chi_{33}^*)$ – квадрат коефіцієнта

електромеханічного зв'язку п'єзокераміки в режимі радіальних коливань диску, поляризованого по товщині; $C_{\vartheta}^* = \pi R^2 \chi_{33}^* / \alpha$ – динамічна електрична ємність п'єзокерамічного диска для режиму планарних коливань, тобто електрична ємність в області середніх частот; $\chi_{33}^* = \chi_{33}^{\epsilon} (1 + \Delta \chi_{33}^*)$ – діелектрична проникність для режиму планарних коливань; надбавка $\Delta \chi_{33}^* = e_{33}^{\epsilon} / (\chi_{33}^{\epsilon} c_{33}^{\epsilon})$; $J_0(\lambda R)$ і $J_1(\lambda R)$ – функції Бесселя нульового та першого порядку відповідно; c_{33}^{ϵ} , c_{12} , e_{31}^* – матеріальні константи; $k = c_{12} / c_{11}$.

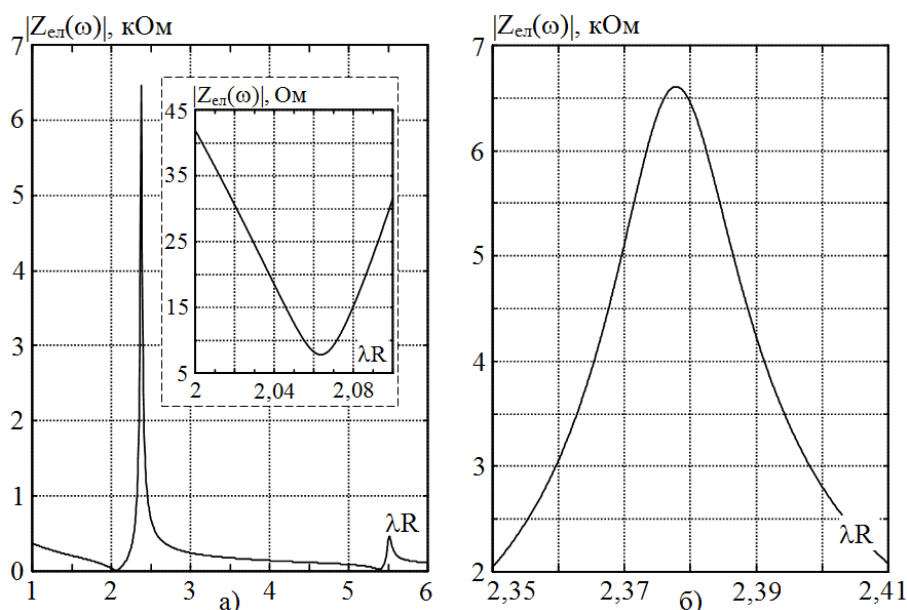


Рис. 2. Модуль електричного імпедансу п'єзокерамічного диска в області середніх частот

На рис. 2 показана зміна модуля електричного імпедансу п'єзокерамічного диска в діапазоні середніх частот (рис. 2.4,а). На вставці в поле рис. 2.4,а показано зміну значень модуля $Z_{\text{ел}}(\omega)$ в найближчій околиці частоти ω_{r1} першого електромеханічного резонансу. На рис. 2.4,б показана зміна модуля електричного імпедансу в околиці частоти ω_{a1} першого

електромеханічного антирезонансу. Геометричні і фізико-механічні параметри диска,

які використовувалися при обчисленнях за формулою (2) були прийняті наступними: радіус п'єзокерамічного диску $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м; товщина $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м; параметри матеріалу диска (п'єзокераміки): $c_{11}^E = 110$ ГПа; $c_{12}^E = 60$ ГПа; $c_{33}^E = 100$ ГПа; $e_{33} = 18$ Кл/м²; $e_{31} = -8$ Кл/м² и $\chi_{33}^E = 1400\chi_0$; $Q_m = 100$; $k = c_{12}/c_{11} = 0,324$. По осі ординат відкладені значення модуля електричного імпедансу в кілоомах, по осі абсцис відраховується безрозмірна частота $\Omega = \lambda R = \omega\tau_0$, де $\tau_0 = R/v$ – часовий масштаб; $v = \sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – швидкість поширення пружних коливань у тонкому диску. Для наведених вище значень параметрів $v = 3162$ м/с і $\tau_0 = 10,44 \cdot 10^{-6}$ с. Розрахунки були виконані на частотах перших двох електромеханічних резонансів. Для експериментальних досліджень був використаний дисковий п'єзоелектричний елемент $\varnothing 66 \times 3$ мм з кераміки сорту ЦТС.

На рис. 3 наведені розрахункова (суцільна лінія) і експериментально отримана (штрихова лінія) криві частотної залежності електричного імпедансу п'єзоелектричного диску в області середніх частот. По осі ординат відкладаються значення електричного імпедансу п'єзоелектричного диску, а по осі абсцис – частота f (безрозмірна величина $\Omega = \omega\tau_0$, де $\tau_0 = R/\sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – постійна часу п'єзокерамічного диску). Значенню $\Omega = 1$ відповідає частота $f = 15206$ Гц.

Згідно з розрахунками, частоти першого і другого електромеханічних

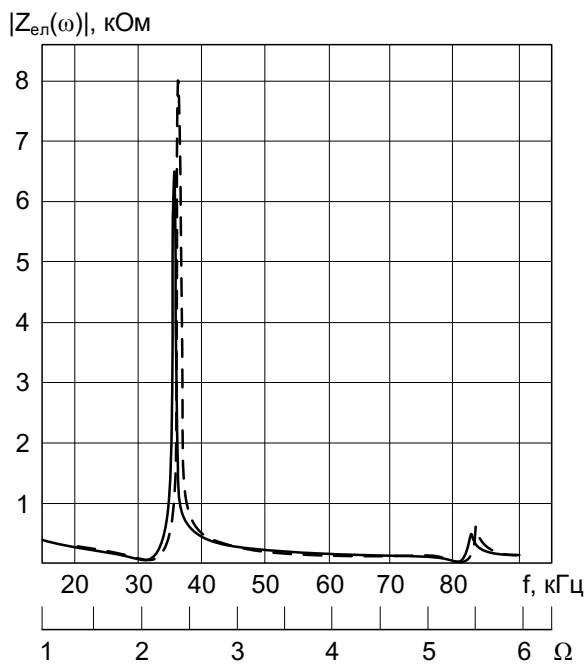


Рис. 3. Розрахункова (суцільна лінія) і експериментально отримана (штрихова лінія) криві частотної залежності електричного імпедансу п'єзоелектричного диску в області середніх частот

резонансів відповідно дорівнюють $f_{r1} = 31410$ Hz і $f_{r2} = 81352$ Hz; відношення частот $\zeta = f_{r2}/f_{r1} = 2,59$.

Експериментальні значення тих же величин дорівнюють відповідно $f_{r1} = 31940$ Hz, $f_{r2} = 82930$ Hz і $\zeta = f_{r2}/f_{r1} = 2,596$. Якщо

експериментальні дані прийняти в якості істинних, то похибка визначення відношення частот складе $\Delta\zeta = 0,2\%$. Розбіжності абсолютних значень частот резонансів пояснюється невідповідністю фізико-механічних параметрів п'єзокераміки, які були закладені в розрахунок і які притаманні експериментально досліджуваному об'єкту. Зіставляючи криві можна зробити висновок, що добротність матеріалу експериментально досліджуваного зразка мінімум в 1,2 рази більше закладеної в розрахунок добротності. Характер зміни обох кривих, наведених на рис. 3, в досить широкому діапазоні частот збігається з точністю до деталей. Говорячи іншими словами, вираз (2) – математична модель п'єзоелектричного диску в області середніх частот – в достатній мірі адекватний реальному об'єкту і процесам, що відбувається в ньому.

Перед початком вимірювання електричного імпедансу п'єзокерамічний диск зважують і вимірюють його товщину α і радіус R . За відомою масою m і розмірами α і R визначається густина п'єзокераміки $\rho_0 = m/(\pi\alpha R^2)$, кг/м³.

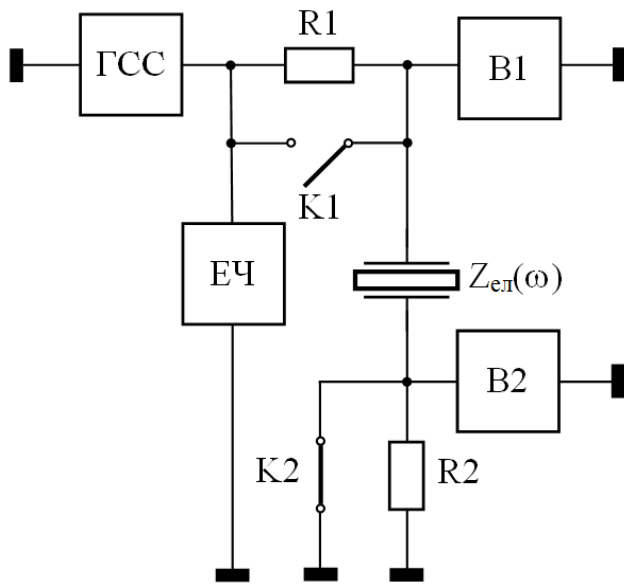


Рис. 4. Електрична схема макета для вимірювання електричного імпедансу п'єзокерамічного диска в широкому діапазоні частот

Вимірювання електричного імпедансу рекомендується проводити на макеті, електрична схема якого показана на рис. 4. На схемі аббревіатурою ГСС позначений генератор синусоїдальних сигналів, ЕЧ – електронний частотомір, В1 і В2 – електронні вольтметри, К1 і К2 – ключі, що механічно замикаються й розмикаються, R1 і R2 – навантажувальні резистори. Символом $Z_{\text{ел}}(\omega)$ на рис. 4 позначений досліджуваний зразок. Показане на схемі положення ключів К1 і К2 відповідає режиму вимірювання електричного імпедансу в околиці частоти електромеханічного резонансу. При вимірах в околиці частот електромеханічного антирезонансу ключ К1 повинен бути замкнутий, а ключ К2 –

розімкнутий. Навантажувальні резистори R1 і R2 підбираються таким чином, щоб вольтметри В1 і В2 працювали в діапазоні своєї максимальної чутливості, тобто на шкалах $(1 \div 10)$ мВ. Величини резисторів R1 і R2 повинні бути визначені з точністю до одного Ома.

Перед початком вимірювань в широкому діапазоні частот на вимірювальному мосту визначається динамічна електрична ємність C_0^{σ} в області низьких частот. За значеннями цієї ємності знаходиться діелектрична проникність $\chi_{33}^{\sigma} = \alpha C_0^{\sigma} / (\pi R^2)$, Ф/м.

В ході вимірювання електричного імпедансу $Z_{\text{ел}}(\omega)$ має бути сформовано чітке уявлення про частотно залежну зміну функції $Z_{\text{ел}}(\omega)$ і повинні бути встановлені межі областей середніх і високих частот, а також визначено межі перехідної області. Після виконання всіх вимірювань утворюється наступна база експериментальних даних:

– *область середніх частот*: частоти першого і другого електромеханічних резонансів (f_{p1} і f_{p2}) і антирезонансу (f_{a1} і f_{a2}), які визначаються з точністю до одного герца;

електричний імпеданс на частотах першого і другого електромеханічних резонансів, тобто дійсні позитивні величини $Z_{\text{ел}}(f_{p1})$ і $Z_{\text{ел}}(f_{p2})$, визначені з точністю до десятих часток Ома;

значення динамічної електричної ємності C_0^* п'єзокерамічного диска, яке визначається через електричний імпеданс диска, виміряний на частоті $f^* = (f_p + f_a)/2$, де

$$f_p = (f_{p1} + f_{p2})/2 \text{ і } f_a = (f_{a1} + f_{a2})/2;$$

– *область високих частот*: частоти першого і другого товщинного

електромеханічного резонансу, тобто величини F_{p1} і F_{p2} , виміряні з точністю до одного герца, а також виміряна з тією ж точністю циклічна частота F_{a1} першого товщинного антирезонансу;

числові значення $Z_{ел}(F_{p1})$ і $Z_{ел}(F_{p2})$ електричного імпедансу диска на частотах першого і другого електромеханічного резонансу, визначені з точністю до десятих часток ома; числове значення динамічної електричної ємності C_{σ}^e , яка, в принципі повинна визначатися на нескінченно великій частоті, коли сили інерції забезпечать режим сталості (рівності нулю) механічних деформацій. В реальній ситуації C_{σ}^e визначається через модуль електричного імпедансу $Z_{ел}(F^e)$, де $F^e \geq (F_{p1} + F_{p2})/2$.

Результати експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки за розробленим методом наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки

Вхідні величини		Вихідні величини	
параметр	значення	параметр	значення
Матеріал	кераміка сорту ЦТС	Частота f_{a1} , Гц	$35,695 \cdot 10^3$
Радіус диска R , м	$33 \cdot 10^{-3}$	Частота f_{a2} , Гц	$84,530 \cdot 10^3$
Товщина диска α , м	$3 \cdot 10^{-3}$	Густина ρ_0 , кг/м ³	7428
Статична ємність C_{σ}^{σ} , Ф	$16,68 \cdot 10^{-9}$	Модуль пружності c_{33}^E , ГПа	105,4
Частота F_{p1} , Гц	$641,748 \cdot 10^3$	Модуль пружності c_{11}^E , ГПа	99,32
Частота F_{p2} , Гц	$1516,364 \cdot 10^3$	Модуль пружності c_{12}^E , ГПа	50,46
Частота F_{a1} , Гц	$714,546 \cdot 10^3$	П'єзомодуль e_{33} , Кл/м ²	13,049
Модуль $Z_{ел}(F_{p1})$, Ом	3,895	П'єзомодуль e_{31} , Кл/м ²	-4,953
Модуль $Z_{ел}(F_{p2})$, Ом	2,282	Діелектр. проникність χ_{33}^{σ} , Ф/м	$14,63 \cdot 10^{-9}$
Частота f_{p1} , Гц	$31,906 \cdot 10^3$	Добротність $Q_{M1}^{(z)}$	48,481
Частота f_{p2} , Гц	$82,840 \cdot 10^3$	Добротність $Q_{M1}^{(p)}$	204,786

У **третьому розділі** побудовано математичні моделі п'єзоелектричних перетворювачів з кільцевим та дисковим електродами в первинному електричному колі та багатосекційних дискових п'єзоелектричних перетворювачів з можливістю групового включення секцій що розширює можливість побудови багатофункціональних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

Дисковий п'єзоелектричний перетворювач в трансформаторному режимі (рис. 5) містить у своєму складі первинне електричне коло, яке складається з генератора різниці електричних потенціалів U_e^{tot} з внутрішнім електричним імпедансом Z_r і дискового електрода (позиція 1 на рис. 5), і вторинне електричне коло, що складається з кільцевого електрода (позиція 2) з підключеною до нього електронною схемою з

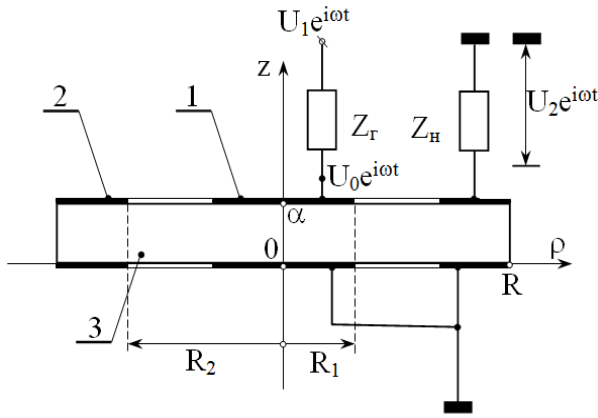


Рис. 5. Розрахункова схема дискового п'єзоелектричного перетворювача з дисковим електродом в первинному електричному колі

вхідним електричним імпедансом Z_H , на якому формується різниця електричних потенціалів $U_2 e^{i\omega t}$. Первинне і вторинне електричні кола п'єзоелектричного перетворювача не мають гальванічного зв'язку. Енергообмін між ними здійснюється за допомогою пружних коливань поляризованого по товщині п'єзокерамічного диска (позиція 3 на рис. 5). Очевидно, що робота функціонального елемента п'єзоелектроніки, який схематично показаний на рис. 5, повністю описується коефіцієнтом трансформації $K(\omega, \Pi) = U_2/U_1$ (символом Π позначений набір електричних, геометричних і фізико-механічних параметрів

перетворювача), який, по суті, є математичною моделлю даного пристрою.

Згідно показаному на рис. 5 розташуванню електродів, в об'ємі п'єзокерамічного диска можна виділити три області, а саме: область 1 ($0 \leq \rho \leq R_1$), область 2 ($R_1 \leq \rho \leq R_2$) и область 3 ($R_2 \leq \rho \leq R$).

Математична модель дискового п'єзоелектричного перетворювача, яка враховує зворотні зв'язки, що існують в об'ємі коливального диску, може бути записана наступним чином:

$$K(\omega, \Pi) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K_2(\Omega, \Pi)}{1 - i\omega C_3^\sigma Z_r F_1^{33}(\Omega, \Pi)}, \quad (3)$$

де $K_2(\Omega, \Pi) = \frac{i\omega C_3^\sigma Z_H K_p^2 \Psi_1(\Omega, R_2)}{1 - i\omega C_3^\sigma Z_H [1 - K_p^2 \Psi_2(\Omega, R_2)]}$; $C_3^\sigma = \pi(R^2 - R_2^2) \chi_{33}^\sigma / \alpha$ – статична електрична ємність електродованої області 3; $C_1^\sigma = \pi R_1^2 \chi_{33}^\sigma / \alpha$ – статична електрична ємність першої області; χ_{33}^σ – діелектрична проникність в напрямку вісі Oz , виміряна в режимі сталості (рівності нулю) механічної напруги (верхній символ σ);

$F_1^{33}(\Omega, \Pi) = \frac{2K_p^2}{\Omega r_1} [A_{11} - K_2(\Omega, \Pi) A_{12}] J_1(\Omega r_1) - 1$ – частотно залежна функція, яка враховує негативний зворотний зв'язок (символ z_3) в об'ємі п'єзоелектричного диску; $r_1 = R_1/R$ – безрозмірний радіус електрода первинного електричного кола трансформатора; K_p^2 – квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку для режиму радіальних коливань тонкого п'єзокерамічного диска;

$$\Psi_1(\Omega, R_2) = \frac{2}{\Omega(1-r_2^2)} \{A_{41} [J_1(\Omega) - r_2 J_1(\Omega r_2)] - A_{51} [N_1(\Omega) - r_2 N_1(\Omega r_2)]\}; \quad r_2 = R_2/R;$$

$$\Psi_2(\Omega, R_2) = \frac{2}{\Omega(1-r_2^2)} \{A_{42} [J_1(\Omega) - r_2 J_1(\Omega r_2)] - A_{52} [N_1(\Omega) - r_2 N_1(\Omega r_2)]\};$$

$J_1(\Omega)$ і $N_1(\Omega)$ – функції Бесселя і Неймана першого порядку; $\Omega = \omega R / \sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – безрозмірне хвильове число.

Вираз (3) є математичною моделлю дискового п'єзокерамічного перетворювача з дисковим електродом в первинному електричному колі, яка враховує зворотні зв'язки, що існують в об'ємі коливального диска.

На рис. 6 показані графіки модуля коефіцієнта трансформації для різних розмірів електродів в первинному та вторинному електричних колах дискового п'єзоелектричного перетворювача. Радіус диска $R = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м, товщина диска $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м. Вихідний електричний імпеданс генератора $Z_r = 50$ Ом, імпеданс електричного навантаження – $Z_n = 1000$ Ом.

Частотно залежні значення коефіцієнта трансформації істотно змінюються при зміні розмірів електродів. Частоти локальних максимумів модуля функції $K(\omega, \Pi)$ також залежать від розмірів електродів. Разом з тим, частоти локальних максимумів розташовуються в найближчій околиці частот електромеханічних резонансів радіально коливального диска.

На рис. 7 показані графіки модуля функції $K(\omega, \Pi)$, які розраховувалися для фіксованих значень радіусів електродів ($R_1 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м і $R_2 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м) диска, і фіксованого значення імпедансу джерела $Z_r = 50$ Ом. Варійованим параметром для сімейства кривих на рис. 7 є значення електричного навантаження Z_n . При малому значенні Z_n трансформатор працює в режимі близькому до короткого замикання у вторинному колі. Коефіцієнт трансформації при цьому, природно, прагне до нуля. Нескладно дійти висновку, що для кожної конкретної конструкції п'єзоелектричного трансформатора існує оптимальне (в сенсі величини коефіцієнта трансформації) значення електричного імпедансу навантаження.

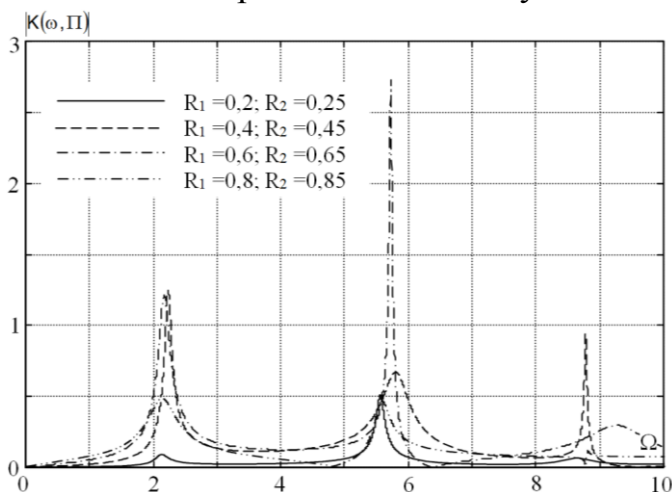


Рис. 6. Абсолютні значення коефіцієнта трансформації для різних розмірів електродів в первинному та вторинному електричних колах дискового п'єзоелектричного перетворювача

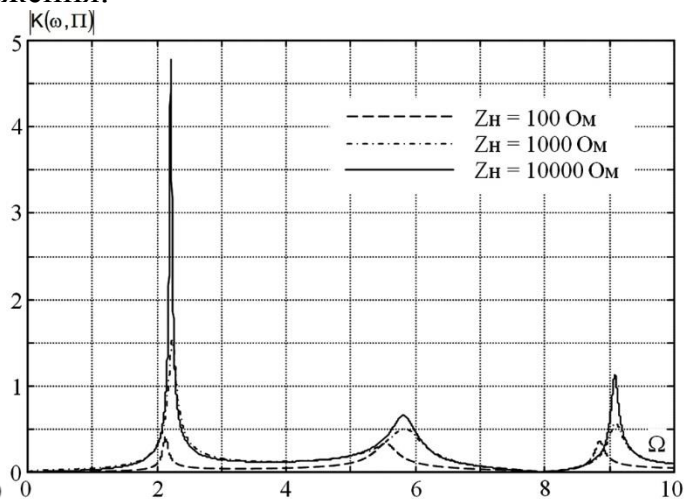


Рис. 7. Абсолютні значення коефіцієнта трансформації для різних значень електричного навантаження Z_n у вторинному електричному колі дискового п'єзоелектричного перетворювача

На рис. 8 наведені розрахункова (суцільна лінія) і експериментально отримана (штрихова лінія) криві частотної залежності модуля коефіцієнта трансформації

п'єзокерамічного дискового перетворювача. По осі ординат відкладаються значення модуля коефіцієнта трансформації, а по осі абсцис – частота f (безрозмірна величина $\Omega = \omega\tau_0$, де $\tau_0 = R/\sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – постійна часу п'єзокерамічного диску). Значенню $\Omega = 1$ відповідає частота $f = 15206$ Гц.

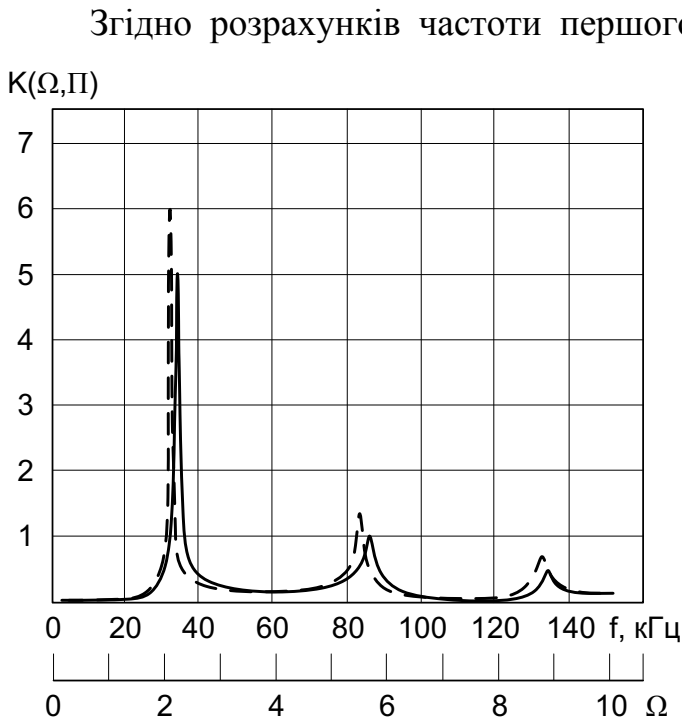


Рис. 8. Розрахункова (суцільна лінія) і експериментально отримана (штрихова лінія) криві частотної залежності модуля коефіцієнта трансформації

математична модель п'єзоелектричного перетворювача з дисковим електродом в первинному електричному колі – в достатній мірі адекватний реальному об'єкту і процесам, що відбувається в ньому.

П'єзоелектричний перетворювач з кільцевим електродом у первинному електричному колі представлено на рис. 9. Первинне електричне коло перетворювача складається з генератора різниці електричних потенціалів $U_1 e^{i\omega t}$ з вихідним електричним опором Z_r і кільцевого електрода (позиція 1 на рис. 9). Вторинне електричне коло складається з електрода в формі диска (позиція 2) з підключеною до нього електронною схемою з вхідним електричним опором Z_n , на якому формується різниця електричних потенціалів $U_2 e^{i\omega t}$

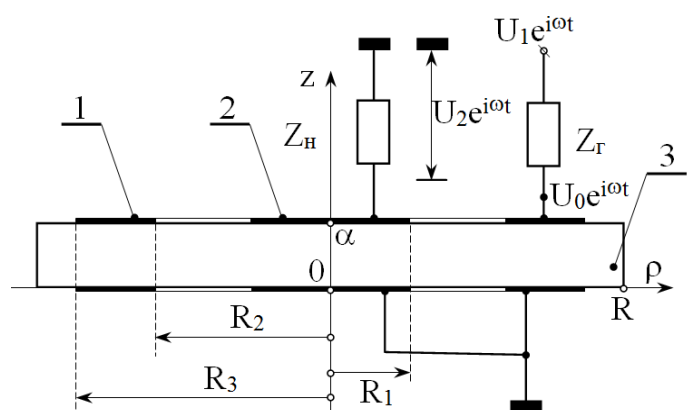


Рис. 9. Розрахункова схема дискового п'єзоелектричного трансформатора п'єзокерамічного дискового перетворювача

другого і третього електромеханічних резонансів відповідно дорівнюють $f_{r1} = 33453$ Hz, $f_{r2} = 86195$ Hz і $f_{r3} = 136375$ Hz; відношення частот $\zeta = f_{r2}/f_{r1} = 2,577$.

Експериментальні значення тих же величин дорівнюють відповідно $f_{r1} = 32351$ Hz, $f_{r2} = 84429$ Hz, $f_{r3} = 134415$ Hz і $\zeta = f_{r2}/f_{r1} = 2,61$. Якщо експериментальні дані прийняти в якості істинних, то похибка визначення відношення частот складе $\Delta\zeta = 1,3\%$. Зіставляючи криві можна зробити висновок, що добротність матеріалу експериментально досліджуваного зразка мінімум в 1,2 рази більше закладеної в розрахунок добротності. Характер зміни обох кривих, наведених на рис. 8, в досить широкому діапазоні частот збігається з точністю до деталей. Говорячи іншими словами, вираз (3) –

математична модель п'єзоелектричного перетворювача з дисковим електродом в первинному електричному колі – в достатній мірі адекватний реальному об'єкту і процесам, що відбувається в ньому.

Математична модель дискового п'єзокерамічного перетворювача з кільцевим електродом в первинному електричному колі може бути записана наступним чином:

$$K(\omega, \Pi) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K_2(\Omega, \Pi)}{1 - i\omega C_0^\sigma Z_r K_3(\Omega, \Pi)}, \quad (4)$$

$$K_2(\Omega, \Pi) = \frac{2f_e(\omega) K_{31}^2 A_{12} [J_1(\Omega R_1/R)/(\Omega R_1/R)]}{1 - 2f_e(\omega) K_{31}^2 A_{11} [J_1(\Omega R_1/R)/(\Omega R_1/R)]};$$

символом Π позначений набір геометричних, електричних і фізико-механічних параметрів трансформатора; K_{31}^2 – квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку для режиму радіальних коливань матеріальних частинок поляризованого по товщині п'єзокерамічного диска; символом $f_e(\omega)$ позначена функція включення електрода у

вторинному електричному колі п'єзоелектричного трансформатора; $f_e(\omega) = \frac{i\Omega^*}{1 - i\Omega^*}$,

$\Omega^* = \omega\tau_n$ – безрозмірна величина; $\tau_n = C_1^\sigma Z_n$ – постійна часу вторинного електричного кола п'єзоелектричного перетворювача; $C_1^\sigma = \pi R_1^2 \chi_{33}^\sigma / \alpha$ – статична електрична ємність електрода у вторинному електричному колі п'єзоелектричного трансформатора;

$$K_3(\Omega, \Pi) = \frac{2K_{31}^2}{1 - \beta^2} \{ [K_2(\Omega, \Pi) A_{41} + A_{42}] J(\Omega) + [K_2(\Omega, \Pi) A_{51} + A_{52}] N(\Omega) \} - 1;$$

$$J(\Omega) = [J_1(\Omega R_3/R) - \beta J_1(\beta \Omega R_3/R)] / (\Omega R_3/R); \quad N(\Omega) = [N_1(\Omega R_3/R) - \beta N_1(\beta \Omega R_3/R)] / (\Omega R_3/R);$$

$\beta = R_2/R_3$ – геометричний параметр кільця; $J_1(\Omega)$ і $N_1(\Omega)$ – функції Бесселя і Неймана першого порядку.

Вираз (4), що визначає коефіцієнт передачі п'єзоелектричного пристрою з електричного входу на електричний вихід, має конструкцію, яка є типовою для електронних пристроїв з негативним зворотним зв'язком. Чітко видно, що глибина зворотного зв'язку прямо пропорційна значенню вихідного опору джерела сигналу, тобто імпедансу Z_r . При значенні $Z_r = 0$ зворотний зв'язок зникає, і коефіцієнт трансформації повністю визначається частотно залежною функцією $K_2(\Omega, \Pi)$.

З метою визначення впливу вихідного імпедансу джерела електричного сигналу на коефіцієнт трансформації п'єзоелектричного трансформатора була виконана серія розрахунків (рис. 10). Розрахунки були виконані для п'єзоелектричного перетворювача радіусом $R = 25 \cdot 10^{-3}$ м і товщиною $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м. Матеріал диска – поляризована по товщині п'єзокераміка сорту ЦТС з наступними параметрами: $\rho_0 = 7400$ кг/м³; $c_{11}^E = 112$ ГПа; $c_{12}^E = 62$ ГПа; $c_{33}^E = 100$ ГПа; $e_{33} = 20$ Кл/м²; $e_{31} = -9$ Кл/м²; $\chi_{33}^E = 1800 \chi_0$; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична постійна. По осях ординат відкладені числові значення модуля коефіцієнта трансформації. По осях абсцис – безрозмірна частота $\Omega = \omega\tau_0$, де $\tau_0 = R/\sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – постійна часу розглянутого п'єзокерамічного диска. З результатів випливає, що, зміна параметра Z_r супроводжується суттєвими змінами частотної характеристики п'єзокерамічного дискового перетворювача. На рис. 10 показано вплив механічної добротності Q_m матеріалу диска на зміну коефіцієнта трансформації у вузькій смузі частот в околиці частоти першого електромеханічного резонансу радіальних коливань вільного (не закріпленого по контуру $\rho = R$) п'єзокерамічного диска. Числові значення добротностей вказані в полі рисунків цифрами біля відповідних кривих. Збільшення вихідного опору джерела

електричного сигналу супроводжується істотним зменшенням впливу механічної добротності матеріалу диска на коефіцієнт трансформації.

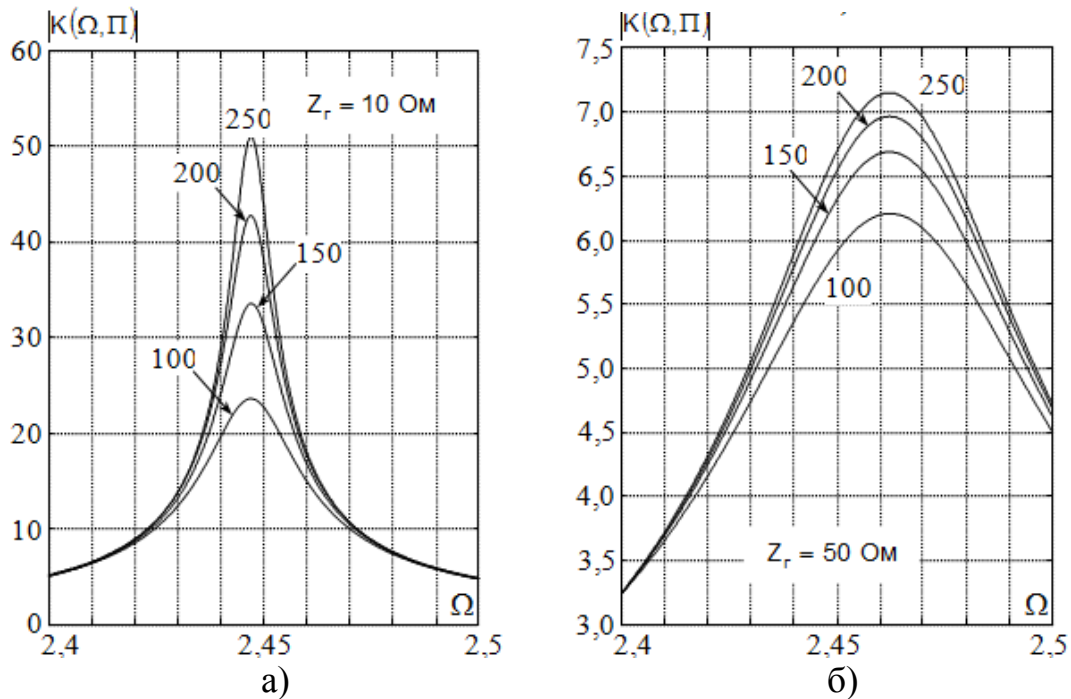


Рис. 10. Вплив вихідного опору джерела сигналу на частотно залежну зміну модуля коефіцієнта трансформації при відносних розмірах електродів $R_1/R = 12/25$, $R_2/R = 15/25$, $R_3/R = 0,999$ і електричному навантаженні $Z_r = 10$ кОм

За результатами розрахунків, які показані на рис. 10, можна зробити висновок, що кожному набору фізико-механічних параметрів п'єзоелектрика, кожній конфігурації електродів первинного і вторинного електричного кола та фіксованому електричному навантаженню п'єзоелектричного трансформатора відповідає своє фіксоване значення вихідного опору Z_r джерела електричного сигналу, при якому реалізується максимальний коефіцієнт трансформації в заданому діапазоні частот.

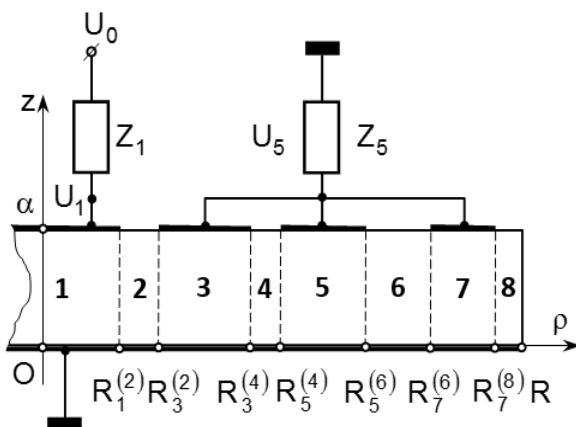


Рис. 11. Розрахункова схема багатосекційного п'єзоелектричного перетворювача

На рис. 11 схематично зображено дисковий перетворювач з трьома кільцевими електродами у вторинних електричних колах. Електрод первинного електричного кола має форму кола радіуса $R_1^{(2)}$. До нього підключено джерело різниці електричних потенціалів $U_0 e^{i\omega t}$. Вихідний опір джерела електричних потенціалів позначено символом Z_1 . Символом Z_5 позначено електричний імпеданс навантаження у вторинному електричному колі перетворювача. Диск виконаний з поляризованої по товщині п'єзокераміки сорту ЦТС. Нижня поверхня ($z = 0$) диска повністю електродована і

заземлена.

Математична модель багатосекційного п'єзокерамічного перетворювача (рис. 11) може бути записана наступним чином:

$$K_5(\omega) = -\frac{\Psi_5(k, R)}{1 - i\omega C_1^* U_1 [\Psi_1(k, R) - 1]}, \quad (5)$$

де частотно залежні безрозмірні функції $\Psi_1(k, R)$ і $\Psi_5(k, R)$ розраховуються за

$$\text{формулами: } \Psi_1(k, R) = \frac{2K_{31}^2 J_1(kR_1^{(2)})}{kR_1^{(2)} D_0} \left[M_1^{(2)} - \Psi_3(k, R) N_1^{(4,6)} - \Psi_5(k, R) N_1^{(8,10)} - \Psi_7(k, R) N_1^{(12,14)} \right];$$

$$\Psi_5(k, R) = \frac{i\omega Z_5 C_5^* q(\omega)}{1 + i\omega Z_5 C_5^* p(\omega)}; \quad C_1^* = \pi \left(R_1^{(2)} \right)^2 \chi_{33}^* / \alpha \quad \text{і} \quad C_5^* = \pi \left[\left(R_5^{(6)} \right)^2 - \left(R_5^{(4)} \right)^2 \right] \frac{\chi_{33}^*}{\alpha} - \text{електричні ємності}$$

областей диска під електродами 1 і 5 відповідно; $C_{2n+1}^* = \left(\pi \chi_{33}^* / \alpha \right) \left[\left(R_{2n+1}^{(2n+2)} \right)^2 - \left(R_{2n+1}^{(2n)} \right)^2 \right] -$

електрична ємність $(2n+1)$ -ої кільцевої області диска ($n=1,2,3$); $q(\omega) = \frac{C_3^*}{C_5^*} \beta_3 + \beta_5 + \frac{C_7^*}{C_5^*} \beta_7$;

$$p(\omega) = \frac{C_3^*}{C_5^*} (\lambda_3 - 1) + \lambda_5 - 1 + \frac{C_7^*}{C_5^*} (\lambda_7 - 1).$$

Вираз (5) відрізняється від всіх відомих, отриманих іншими авторами результатів, тим, що він побудований з урахуванням акустичного зворотного зв'язку, який існує між областю під електродом первинного електричного кола і всіма без винятку областями, розташованими під електродами вторинних електричних кіл.

У **четвертому розділі** побудовано математичну модель п'єзокерамічного перетворювача з секторним електродуванням робочої поверхні диска, який працює на невісесиметричних планарних коливаннях.

Дискові п'єзоелементи з частковим електродуванням однієї або двох поверхонь досить часто використовуються для побудови різних функціональних пристроїв п'єзоелектроніки. П'єзоелектричні диски з секторним електродуванням поверхні є практично основним елементом багатьох мікроелектромеханічних систем. Множинність і різноманіття практичного застосування дисків з секторним електродуванням природним чином стимулює теоретичні дослідження, метою яких є прогнозування характеристик і технічних параметрів пристроїв п'єзоелектроніки, які створюються на їх основі.

Нижня поверхня диску $z=0$ (z – координатна лінія циліндричної системи координат (ρ, φ, z) , сполучена з віссю x_3 правої гвинтової декартової системи координат (x_1, x_2, x_3) (рис. 12)) покрита тонким шаром металу і заземлена, тобто в будь-який момент часу її електричний потенціал дорівнює нулю. Верхня поверхня $z=\alpha$ диску покривається двома секторними електродами (позиції 1 і 2). Секторні електроди 1 і 2 розділяє неелектродований зазор, ширина якого істотно менше товщини α п'єзокерамічного диску.

На секторний електрод 1 подається гармонійно змінна в часі різниця електричних потенціалів $U_0 e^{i\omega t}$. Символом Z_1 позначено комплексний вихідний опір джерела електричного сигналу. Очевидно, що $U_0 = U_1 Z_{en}^{(1)}(\omega) / [Z_1 + Z_{en}^{(1)}(\omega)]$, де U_1 – амплітудне значення різниці потенціалів на виході джерела електричних сигналів;

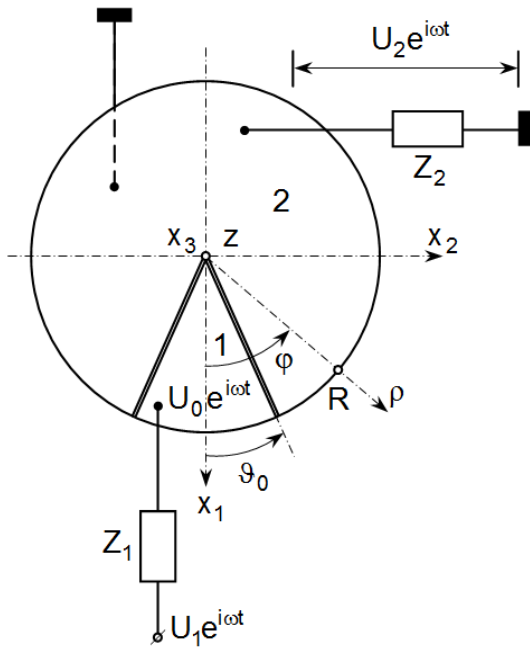


Рис. 12. Конструкція п'єзоелектричного перетворювача з секторними електродами

$Z_{ен}^{(1)}(\omega)$ – електричний імпеданс елемента п'єзокерамічного диску під секторним електродом 1. Електричний потенціал формує під електродом 1 змінне електричне поле, яке породжує в об'ємі п'єзокерамічного диску гармонійно змінні в часі пружні деформації. Внаслідок прямого п'єзоелектричного ефекту гармонійні коливання матеріальних частинок диска генерують на секторному електроді 2 поляризаційний заряд $q_2(t) = Q_2 e^{i\omega t}$, де Q_2 – амплітудне значення поляризаційного заряду. Поляризаційний заряд $q_2(t)$ своїм електричним полем переміщує вільні носії електрики (електрони) в провіднику електричного струму, який з'єднує електричне навантаження Z_2 з секторним електродом 2. При протіканні електричного струму через комплексний опір Z_2 на ньому виділяється різниця потенціалів $U_2 e^{i\omega t}$, де U_2 – амплітудне значення різниці потенціалів

у вторинному електричному колі п'єзоелектричного перетворювача.

Так як джерело електричного потенціалу в первинному електричному колі перетворювача має відмінний від нуля комплексний вихідний опір Z_1 , то амплітудне значення U_0 електричного потенціалу на секторному електроді 1 відрізнятиметься (природно, в меншу сторону) від амплітудного значення U_1 .

Вираз для розрахунку вхідного електричного імпедансу матиме вигляд:

$$Z_{ен}^{(1)} = \frac{1}{i\omega C_1 \Psi^{(0)}(\gamma, \lambda, R)}, \quad (6)$$

де
$$\Psi^{(0)}(\gamma, \lambda, R) = \frac{4K_{31}^2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin^2 m\vartheta_0}{m^2 \vartheta_0} \frac{\Psi_z^{(m,0)}(\gamma, \lambda, R)}{\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)} + 1;$$

символом $\Psi_z^{(m,0)}(\gamma, \lambda, R)$ позначена безрозмірна аналітична конструкція

$$\Psi_z^{(m,0)}(\gamma, \lambda, R) = \frac{1}{\gamma R} \int_0^{\gamma R} \gamma \rho W_z^{(m,0)}(\gamma, \lambda, \rho) d(\gamma \rho); \quad W_z^{(m,0)}(\gamma, \lambda, \rho) - \text{нульове наближення до точного}$$

значення лінійного інваріанта тензора деформацій (об'ємна деформація) в режимі планарних коливань;

$$\begin{aligned} \Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R) &= F_C^{(m,0)}(\lambda, R) [\gamma R J_{\nu_m-1}(\gamma R) - (\nu_m - k) J_{\nu_m}(\gamma R)] + km \left[F_A^{(m,0)}(\gamma, \lambda, R) J_{\mu_m}(\lambda R) + \right. \\ &+ \left. \frac{\pi}{2} N_{\mu_m}(\lambda R) F_C^{(m,0)}(\lambda, R) \int_0^R \frac{1}{x} F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma x) J_{\mu_m}(\lambda x) dx \right]; \quad F_C^{(m,0)}(\lambda, R) = \lambda R J_{\mu_m-1}(\lambda R) - (\mu_m + 1) J_{\mu_m}(\lambda R); \\ F_A^{(m,0)}(\gamma, \lambda, R) &= m J_{\nu_m}(\gamma R) + \frac{\pi}{2} [\lambda R N_{\mu_m-1}(\lambda R) - (\mu_m - 1) N_{\mu_m}(\lambda R)] \int_0^R \frac{1}{x} F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma x) J_{\mu_m}(\lambda x) dx; \end{aligned}$$

$F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma\rho) = \frac{(3-k)m}{1-k} \left\{ J_{\nu_m}(\gamma\rho) + \left(\frac{k+1}{3-k} \right) \gamma\rho \left[J_{\nu_m-1}(\gamma\rho) - \frac{\nu_m}{\gamma\rho} J_{\nu_m}(\gamma\rho) \right] \right\}$; $\mu_m = \sqrt{1 + 2m^2/(1-k)}$ – дробовий порядок функції Бесселя $J_{\mu_m}(\lambda\rho)$ і функції Неймана $N_{\mu_m}(\lambda\rho)$; $\nu_m = \sqrt{1 + (1-k)m^2/2}$ – дробовий порядок функції Бесселя; $k = c_{12}^*/c_{11}^*$ – параметр п'єзоелектрика.

Функція $\Psi^{(0)}(\gamma, \lambda, R)$ є нульовим наближенням до точного значення функції $\Psi(\gamma, \lambda, R)$, яка визначає частотно залежну зміну вхідного електричного імпедансу $Z_{\text{ен}}^{(1)}$ виродженого п'єзоелектричного перетворювача. Коли $\Psi^{(0)}(\gamma, \lambda, R) \rightarrow \infty$, а це спостерігається тоді, коли $\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R) = 0$, електричний імпеданс $Z_{\text{ен}}^{(1)} \rightarrow 0$, що відповідає фізичному стану електромеханічної системи, який називається електромеханічним резонансом. У найближчій околиці частоти електромеханічного резонансу функція $\Psi^{(0)}(\gamma, \lambda, R) = 0$ і $Z_{\text{ен}}^{(1)} \rightarrow \infty$, що відповідає електромеханічному антирезонансу.

На рис. 13 показані результати розрахунків за формулою (6) модуля електричного імпедансу $Z_{\text{ен}}^{(1)}$ для різних значень кутового розміру ϑ_0 секторного електрода. Числові значення ϑ_0 в дугових градусах вказані в полі рисунків. Розрахунки були виконані для п'єзокераміки сорту ЦТС з наступними значеннями фізико-механічних параметрів: $c_{33}^E = 108,6$ ГПа; $c_{11}^E = 94,8$ ГПа; $c_{12}^E = 44$ ГПа; $\chi_{33}^e = 7,0227 \cdot 10^{-9}$ Ф/м; $e_{33} = 13,17$ Кл/м²; $e_{31} = -5,89$ Кл/м²; $\rho_0 = 7428$ кг/м³. Розміри п'єзокерамічного диска: радіус $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м, товщина $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Розрахунок виконувався для двох значень добротності Q_p п'єзокераміки – 80 одиниць (суцільні криві) і 160 одиниць (штрихові криві). Параметр п'єзокераміки $k = c_{12}^*/c_{11}^* = 0,34$.

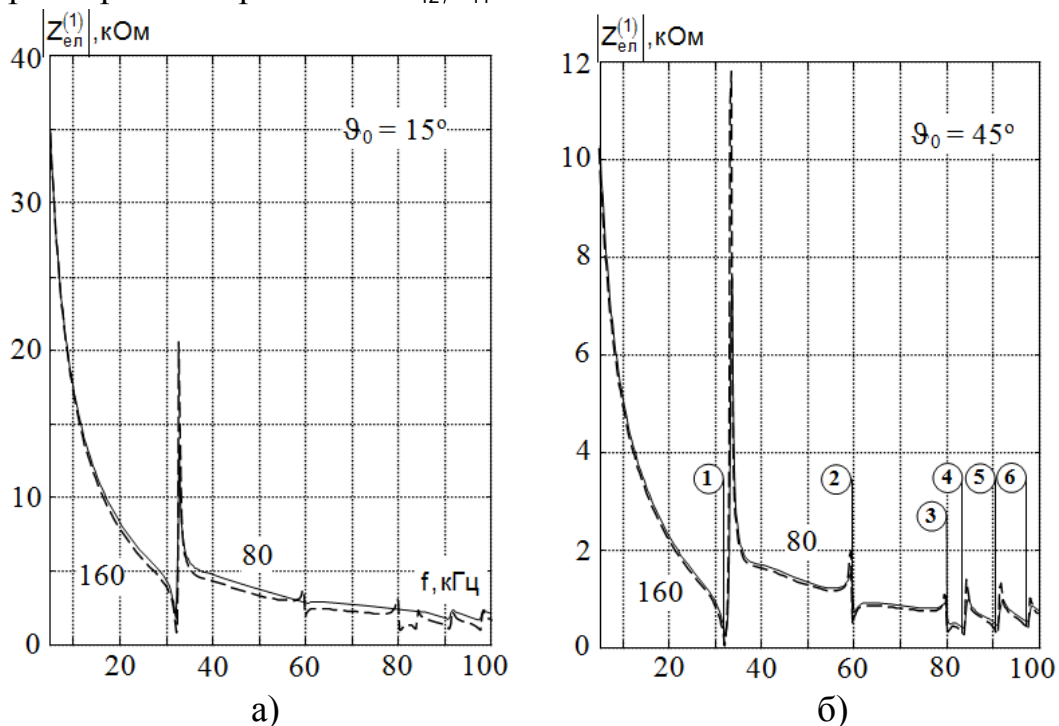


Рис. 13. Модуль електричного імпедансу $Z_{\text{ен}}^{(1)}$ частини п'єзокерамічного диска під секторним електродом 1

По всіх ординат відкладалися значення модуля $Z_{\text{ен}}^{(1)}$ в кілоомах, по осях абсцис – значення частоти f в кілогерцах. Розрахунок електричного імпедансу починався з

частоти $f = 5$ кГц. При виконанні обчислень підсумовувалися перші три окружні гармоніки, тобто вирази зі значеннями індексу $m = 0, 1, 2$. Чітко видно, що зі збільшенням кутового розміру ϑ_0 секторного електрода в діапазоні частот $(5 \div 100)$ кГц проявляються електромеханічні резонанси, які обумовлені нульовою окружною гармонікою (резонанси 1 і 4 на рис. 13, б), першою окружною гармонікою (резонанси 2 і 5) і другою гармонікою (резонанси 3 і 6).

Проведено розрахунки нульового наближення до точного значення частотного рівняння невісесиметричної, номера m , моди планарних коливань тонкого п'єзокерамічного диску $\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)$, причому $\gamma = \omega / \sqrt{c_{11}^* / \rho_0}$ – хвильове число радіальних коливань тонкого диску; $\lambda = \omega / \sqrt{(c_{11}^* - c_{12}^*) / (2\rho_0)}$ – хвильове число окружних планарних коливань матеріальних частинок тонкого п'єзокерамічного диску, де ρ_0 – густина п'єзокераміки; c_{11}^* – модуль пружності тонкого п'єзокерамічного диску для режиму планарних коливань; $c_{12}^* = c_{12}^E (1 - c_{12}^E / c_{33}^E)$; c_{12}^E і c_{33}^E – довідникові значення модулів пружності для поляризованої по товщині диску п'єзокераміки.

Визначено числові значення коренів $\chi_n^{(m)} = \gamma_n^{(m)} R$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) рівняння $\Psi_0^{(m)}(\gamma_n, \lambda_n, R) = 0$ для окружних гармонік з номерами $m \geq 1$ в діапазоні значень безрозмірних хвильових чисел (частот) $\gamma R \leq 10$ для параметра пружних властивостей п'єзокераміки $k = c_{12}^* / c_{11}^* = 0,34$ для невісесиметричних планарних коливань круглого диску, які можуть в ньому виникати через секторне електродування,

Слід звернути увагу на те, що перший корінь $\chi_1^{(1)}$ або, що те ж саме, частота першого електромеханічного резонансу для першої ($m = 1$) окружної моди, має менше значення в порівнянні з частотою першого електромеханічного резонансу вісесиметричних радіальних коливань. Зі зростанням номеру m окружної моди числові значення безрозмірної частоти $\gamma_1^{(m)} R$ монотонно зростають, і тому загальне число коренів рівняння $\Psi_0^{(m)}(\gamma_n, \lambda_n, R) = 0$ в будь-якому фіксованому діапазоні числових

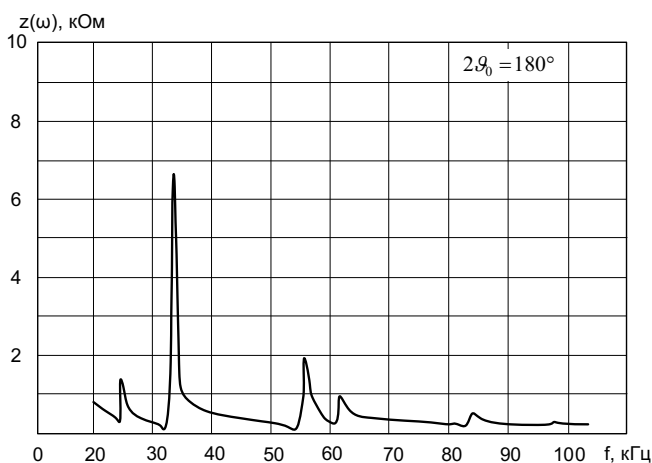


Рис. 14. Електричний імпеданс п'єзоелектричного диску з секторними електродами

значень безрозмірних хвильових чисел (частот) має фіксоване (обмежене) значення.

Для експериментальних досліджень був використаний дисковий п'єзоелектричний елемент $\varnothing 66 \times 3$ мм з кераміки сорту ЦТС. Результати вимірювання електричного імпедансу п'єзоелектричного диску з секторними електродами показано на рис. 14.

Експериментальні дослідження показали, що в міру зменшення кута розкриття сектора у формуванні напружено-деформованого стану диска починають приймати все більше число невісесиметричних мод, і число

резонансів після першого вісесиметричного радіального резонансу зростає.

У **п'ятому розділі** розроблено конструкцію (рис. 15) і побудовано математичну модель біморфного п'єзоелектричного перетворювача, принцип дії якого заснований на використанні вісесиметричних коливань поперечного вигину.

На рис. 15 позицією 1 вказана нерухома опора, позицією 2 – металевий диск, позицією 3 – два однакових п'єзокерамічних диска. Поверхні дисків, які знаходяться в механічному контакті з металевим диском, повністю електродовані і приклеєні високомолекулярних струмопровідних клеєм до металевої круглої пластини. Металева пластина заземлена. На зовнішніх поверхнях п'єзокерамічних дисків розташовуються два кільцевих електрода. На рис. 15, б показаний вид зверху на дисковий біморфний п'єзоелектричний трансформатор. Позицією 4 на рис. 15, б показаний кільцевий електрод первинного електричного кола. Точно такий же електрод є на зовнішній поверхні нижнього п'єзокерамічного диска. На цю пару кільцевих електродів подається різниця електричних потенціалів від джерела електричних сигналів з вихідним електричним опором Z_1 .

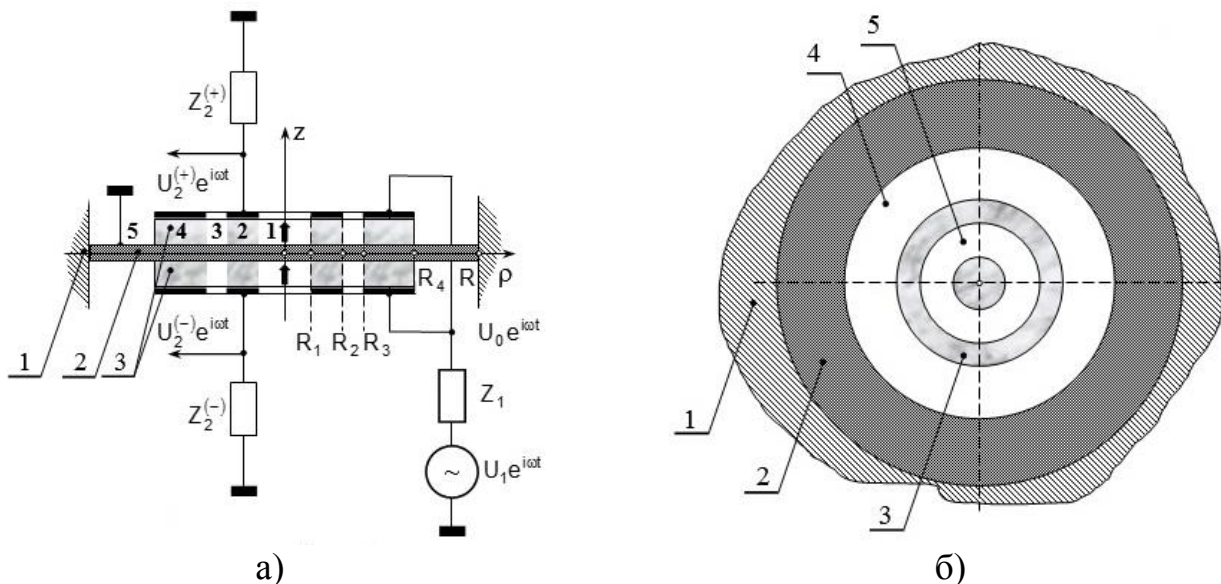


Рис. 15. Схема біморфного дискового п'єзоелектричного перетворювача

Напрямки електричної поляризації п'єзокерамічних дисків показані на рис. 15, а жирними стрілками. При такому механічному поєднанні п'єзокерамічних дисків електричний потенціал $U_0e^{i\omega t}$ на парі кільцевих електродів первинного електричного кола створює, завдяки зворотному п'єзоелектричному ефекту, що змінюються в часі за законом $e^{i\omega t}$ згинальні моменти в області номер 4 (рис. 15, а), тобто в кільці $R_3 \leq \rho \leq R_4$. Під дією цих згинальних моментів вся конструкція починає здійснювати вісесиметричні коливання поперечного вигину. Виникаючі при цьому деформації формують в об'ємі п'єзокерамічних дисків змінну в часі за законом $e^{i\omega t}$ електричну поляризацію. На кільцевих електродах вторинного електричного кола дискового п'єзоелектричного трансформатора (позиція 5 на рис. 1, б) виникають електричні заряди, які своїм електричним полем змушують рухатися вільні носії електрики в провідниках, які з'єднують електричні навантаження (символи $Z_2^{(\pm)}$ на рис. 1, а) з електродами вторинного електричного кола. В результаті протікання електричного

струму на електричних навантаженнях $z_2^{(\pm)}$ формуються електричні потенціали $U_2^{(\pm)} e^{i\omega t}$, які є вихідними електричними сигналами розглянутого функціонального елемента п'єзоелектроніки.

На рис. 15, а цифрами 1, 2, 3 і 4 пронумеровані різні за своїми фізичними властивостями області п'єзокерамічних дисків. В областях непарних номерів $n=1;3$ відсутнє електродне покриття на зовнішніх поверхнях дисків (область №1: $R \leq R_1$, область №3: $R \in (R_2; R_3]$). В областях парних номерів $m=2;4$ зовнішні поверхні дисків мають електродне покриття (область №2: $R \in (R_1; R_2]$, область №4: $R \in (R_3; R_4]$). Область №5 – це кільце металевої пластини $R_4 \leq R$ (рис. 15, а).

У загальному випадку можлива ситуація, коли $z_2^{(+)} \neq z_2^{(-)}$. Внаслідок цього амплітудні значення вихідних потенціалів $U_2^{(+)} \neq U_2^{(-)}$. Побудовано математичну модель біморфного дискового п'єзоелектричного перетворювача з симетричним електричним навантаженням у вторинному електричному колі:

$$K^{(+)}(\omega, \Pi) = \frac{K_0^{(2)}(\omega, \Pi_2)}{1 + 2i\omega C_4^\sigma Z_1 [\Psi_{40}(\lambda_2, \Gamma_4) + 1]}, \quad (7)$$

де символом Π_2 позначений набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів області №2 біморфного п'єзоелектричного перетворювача; символ Γ_4 позначає набір геометричних параметрів області №4; $C_4^\sigma = \pi(R_4^2 - R_3^2)\chi_{33}^\sigma/\alpha$ – динамічна електрична ємність кільцевого об'єму верхнього п'єзокерамічного диска п'єзоелектричного трансформатора; χ_{33}^σ – діелектрична проникність; α – товщина диску; Z_1 – відмінний від нуля комплексний вихідний опір джерела електричного потенціалу; λ_2 – хвильове число згинальних коливань в парних по номеру областях активної зони біморфного п'єзоелектричного елемента; $K_0^{(2)}(\omega, \Pi_2)$ – коефіцієнт електроакустичного зв'язку; символом $\Psi_{40}(\lambda_2, \Gamma_4)$ позначена аналітична конструкція

$$\Psi_{40}(\lambda_2, \Gamma_4) = \frac{2e_{31}^*(h + \alpha/2)\alpha}{(R_4^2 - R_3^2)\chi_{33}^\sigma} [\Xi_{40}(\lambda_2 R_4) - \Xi_{40}(\lambda_2 R_3)];$$

$$\Xi_{40}(\lambda_2 \rho) = \lambda_2 \rho \left\{ \left[\beta_{11,2} K_0^{(2)}(\omega, \Pi_2) + \beta_{11,0} \right] J_1(\lambda_2 \rho) - \left[\beta_{12,2} K_0^{(2)}(\omega, \Pi_2) + \beta_{12,0} \right] N_1(\lambda_2 \rho) - \right. \\ \left. - \left[\beta_{13,2} K_0^{(2)}(\omega, \Pi_2) + \beta_{13,0} \right] I_1(\lambda_2 \rho) - \left[\beta_{14,2} K_0^{(2)}(\omega, \Pi_2) + \beta_{14,0} \right] K_1(\lambda_2 \rho) \right\},$$

β_{k2} і β_{k0} – чутливості зміщень матеріальних частинок (розмірність метр, поділений на вольт) біморфного п'єзоелектричного перетворювача до потенціалів U_2 і U_0 ; $2h$ – товщина металевої пластини; $J_1(\lambda_2 \rho)$ і $I_1(\lambda_2 \rho)$ – функція Бесселя і модифікована функція Бесселя першого порядку; $N_1(\lambda_2 \rho)$ і $K_1(\lambda_2 \rho)$ – функція Неймана і функція Макдональда першого порядку. При цьому розглядалися тонкі круглі пластини, товщина яких на порядок менше їх діаметра.

Біморфні п'єзокерамічні елементи, в яких збуджуються пружні коливання поперечного вигину, застосовуються для вирішення досить широкого кола наукових і технічних задач. Розроблені методи синтезу п'єзоелектричних перетворювачів дозволяють не тільки розширити можливості технології проектування, але і створювати перетворювачі з необхідними характеристиками.

Особливий інтерес представляє технологія додаткових елементів, так як в цьому випадку не потрібна будь-яка доробка п'єзоелемента, а зміна характеристик перетворювача здійснюється за рахунок зовнішніх для п'єзоелемента кіл. Суть цієї технології полягає в тому, що до п'єзоелемента приєднують додаткові елементи, які змінюють характеристики перетворювача. До п'єзоелемента механічно приєднують другий п'єзоелемент, металеву пластину або ультразвуковий концентратор, або електричними зв'язками приєднують ємність, індуктивність або опір.

Для експериментальних досліджень був використаний електроакустичний перетворювач ЗП-19. Перетворювач складається з пластини зі сталі 40Х діаметром 32 і товщиною 0,15 мм. До пластині приклеєний епоксидним компаундом п'єзоелемент Ø23 і товщиною 0,2 мм. Біморфний елемент закріплений в корпусі з ударостійкого полістиролу. Схеми підключення п'єзоелектричного перетворювача з додатковими індуктивністю та ємністю представлені на рис. 16.

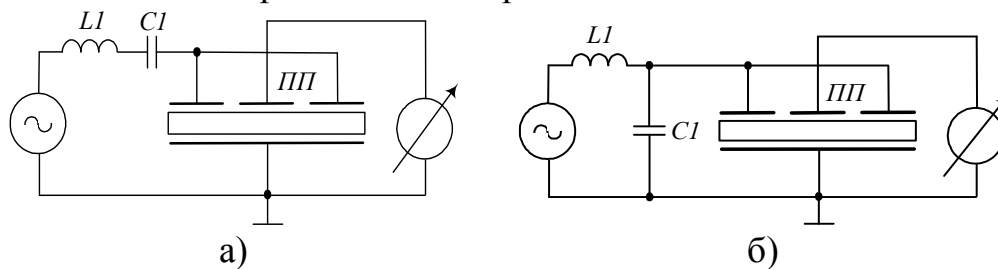


Рис. 16. П'єзоелектричний перетворювач з додатковими індуктивністю та ємністю

У першому варіанті (рис. 16, а) додаткова ємність $C1$ підключається послідовно $L1$. При послідовному з'єднанні $C1$ і вхідної міжелектродної ємності п'єзоелемента C_{ex} сумарна ємність зменшується, тому слід очікувати зсуву резонансних частот в область високих частот. Це видно з наведених АЧХ для цього варіанта (рис. 17, а). У другому випадку (рис. 16, б) утворюється коливальний контур $L1(C1 + C_{ex})$, що призводить до зсуву резонансної частоти в область низьких частот (рис. 17, б).

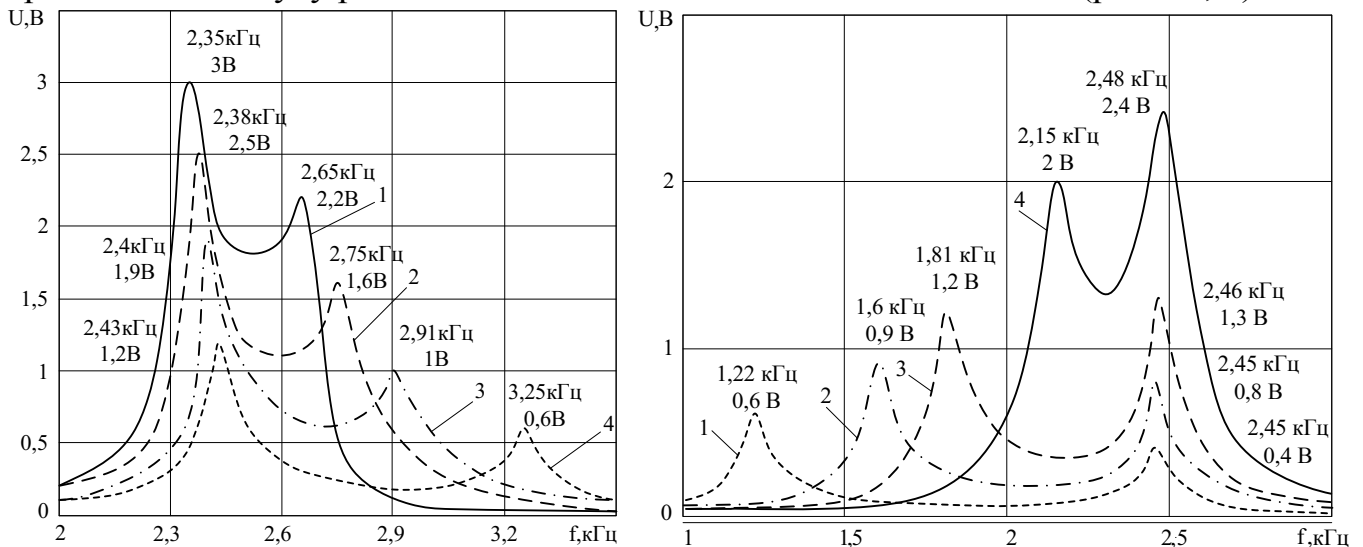


Рис. 17. Амплітудно-частотні характеристики п'єзоелектричного перетворювача а) згідно з рис. 16, а при $L1 = \text{const}$, 1 – $C = 60$ нФ, 2 – $C = 33$ нФ, 3 – $C = 22$ нФ, 4 – $C = 14$ нФ; б) згідно з рис. 16, б при $L1 = \text{const}$, 1 – $C = 33$ нФ, 2 – $C = 14$ нФ, 3 – $C = 7$ нФ, 4 – $C = 1$ нФ

Для розширення робочого діапазону п'єзоелементи можуть включатися в схеми електричних фільтрів. Найбільш часто в цих випадках використовуються схеми фільтрів нижніх і верхніх частот.

На рис. 18 показана схема підключення додаткового опору на вхід перетворювача, а на рис. 19 – її амплітудно-частотні характеристики.

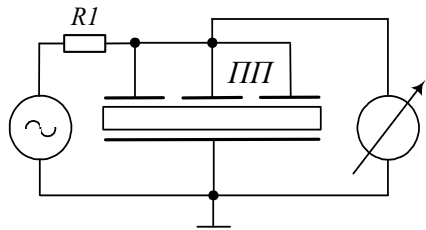
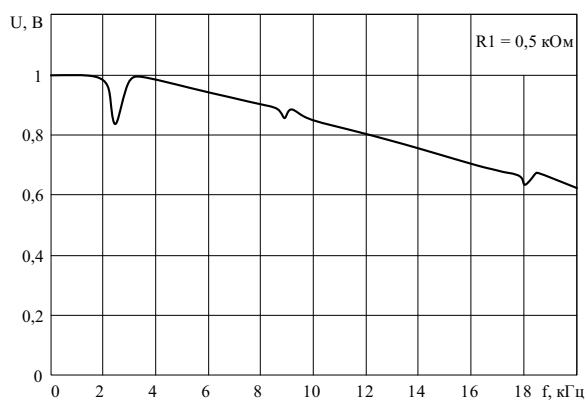
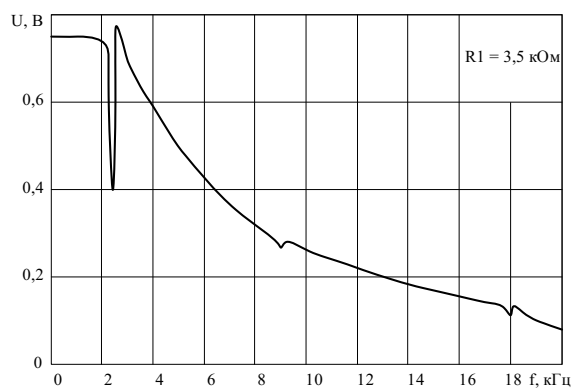


Рис. 18. Схема підключення додаткового опору $R1$ на вхід перетворювача



а)



б)

Рис. 19. Амплітудно-частотна характеристика п'єзоелектричного перетворювача з додатковим опором $R1$ згідно з рис. 18: а) $0,5 \text{ кОм}$; б) $3,5 \text{ кОм}$

На рис. 20 показана схема підключення додаткового опору між п'єзоелектричним перетворювачем і загальним проводом, а на рис. 21 – її амплітудно-частотні характеристики.

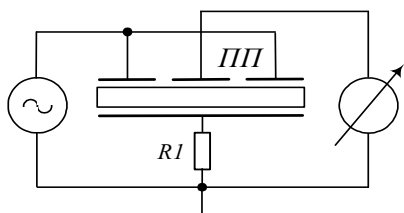
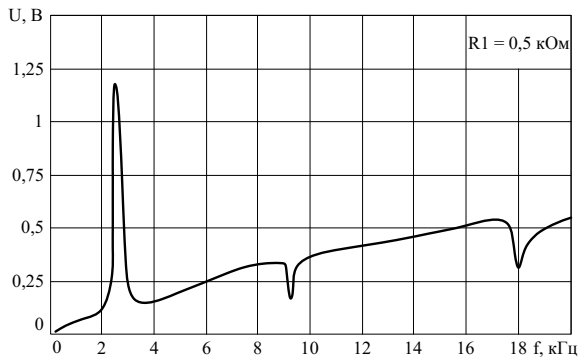
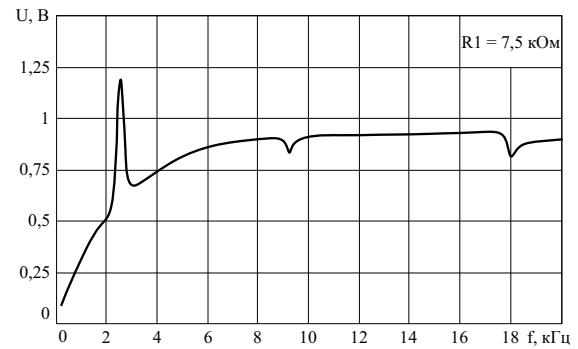


Рис. 20. Схема підключення додаткового опору $R1$ між п'єзоелектричним перетворювачем і загальним проводом

Як видно з рис. 19, 21 підключення додаткового опору на вхід п'єзоелектричного перетворювача або між п'єзоелектричним перетворювачем та загальним проводом, тобто створення схем фільтрів нижніх або верхніх частот на основі п'єзоелектричного перетворювача дозволяє управляти полозою частот пропускання перетворювача.



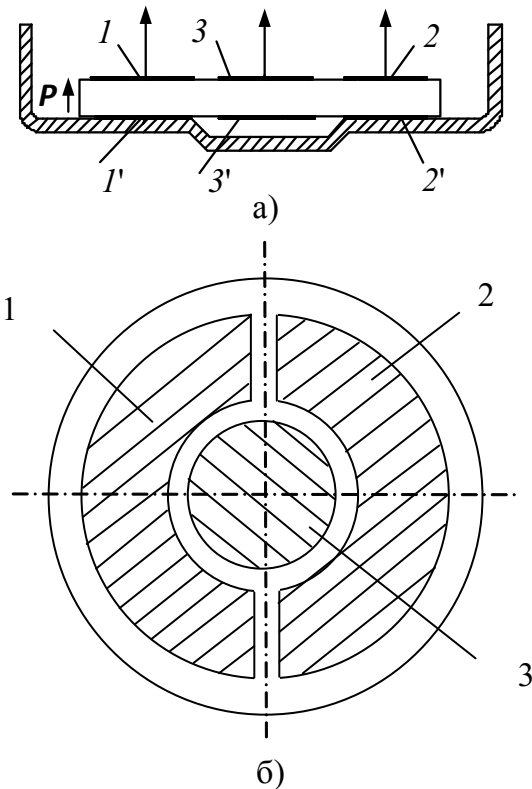
а)



б)

Рис. 21. Амплітудно-частотна характеристика п'єзоелектричного перетворювача з додатковим опором R_1 згідно з рис. 20: а) 0,5 кОм; б) 7,5 кОм

На основі біморфних п'єзоелектричних елементів з розділеними електродами можуть бути побудовані також датчики звукового тиску. Один із можливих варіантів конструкції датчика показано на рис. 22.



б)



в)

Рис. 22. Конструкція датчику тиску (а, б) та дослідний стенд з віброакустичною камерою (в)

Датчик складається з п'єзоелементу діаметром 30 і товщиною 0,8 мм. П'єзоелемент приклеєний до металевій пластині (латунь) товщиною 0,3 мм. Датчик має 3 системи електродів – 1-1', 2-2' і 3-3'. Електроди 1' і 2' з'єднані один з одним через металеву пластину. Датчик встановлювався в віброакустичну камеру (рис. 22, в), де він піддавався впливу звуковим тиском 10 Па (114 дБ) на частоті 200 Гц.

Результати вимірювання вихідної напруги датчику тиску на основі п'єзоелектричного елемента з розділеними електродами наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Значення вихідної напруги датчику тиску на основі п'єзоелектричного елемента з розділеними електродами

Електроди	1-1'	2-2'	3-3'	3-1'	1-3'	2-3'
Чутливість по напрузі, мВ/Па	2,6	2,7	2,0	1,3	4,0	4,2
Ємність між електродами, нФ	4,08	3,93	1,36	0,34	0,31	0,32

Як видно з табл. 2, в залежності від схеми підключення електродів до вимірювального приладу чутливість датчика може змінюватися практично в три рази. Причому збільшення чутливості досягається для випадку, коли кут між вектором електричного поля вихідного сигналу і вектором поляризації близький до 90° .

У **шостому розділі** запропоновано метод модифікації струмопровідних електродів елементів із п'єзоелектричної кераміки та досліджено стан поверхні п'єзоелектричних перетворювачів, а також розміри сформованих в ній структур за допомогою атомно-силової мікроскопії.

Основними показниками якості п'єзоелектричного виробу, які впливають на безперебійну роботу і надійність їх експлуатації є дотримання необхідного рівня мікронерівностей поверхонь п'єзоелектричних елементів і відсутність на них мікрodefektів.

Розроблено комбінований метод осадження металевих покриттів на поверхню діелектричних матеріалів з подальшою її низькоенергетичною електронно-променевою модифікацією. Суть такого методу полягає в термічному (резистивному чи електронно-променевому) осадженні матеріалу покриття (наприклад, Ag) у вакуумі $(5-6) \cdot 10^{-3}$ Па на підготовлену спеціальним способом п'єзокерамічну поверхню та подальшою дією (в одному технологічному циклі) електронного потоку фіксованої потужності на поверхню п'єзоелектричного матеріалу. Така дія призводить до розігріву та ущільнення матеріалу покриття з одночасним збільшенням глибини його дифузійного проникнення у матеріал п'єзоелементу.

В основі технології отримання модифікованих електродів на п'єзокерамічних елементах лежить комбінований процес термічного вакуумного осадження тонкого срібного покриття (товщиною 80...120 мкм) на основі з п'єзоелектричної кераміки марки ЦТС-19.

Вихідною речовиною для отримання покриття на п'єзокераміці був прокалібрований за розмірами частинок порошок Ag («хч» (хімічно чистий), дисперсність – 1,2...1,6 мкм). Виробник порошку – ТОВ «Порошкові нанотехнології» (м. Черкаси).

На рис. 23 представлені профілі поверхні п'єзоелементів, отриманих традиційним шляхом в початковий момент часу (профіль 1) і через 5 років експлуатації (профіль 2), а також отриманого нанесенням покриття у вакуумі (профіль 3) і через 5 років експлуатації (профіль 4). З отриманих профілограм видно,

що експлуатація виробів, отриманих обома способами, з часом збільшує мікронерівності в 1,5...3,6 рази.

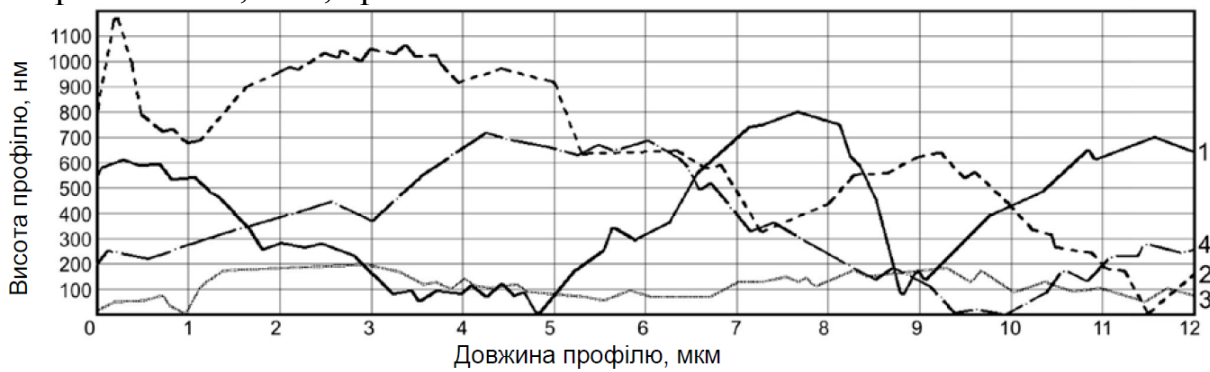


Рис. 23. Профілі поверхні п'єзоелементу: отриманого традиційним шляхом в початковий момент часу (профіль 1) та через 5 років експлуатації (профіль 2); отриманого нанесенням покриття у вакуумі (профіль 3) та через 5 років експлуатації (профіль 4)

Аналіз результатів АСМ досліджень поверхонь п'єзоелектричних елементів дозволив встановити, що в процесі тривалої експлуатації відбувається руйнування їх поверхонь (рис. 23) (збільшення мікронерівностей від 805...815 нм до 1130...1180 нм (поверхні отримані традиційним методом), а також від 180...210 нм до 680...710 нм (поверхні отримані методом термічного напилення у вакуумі), поява мікротріщин, відколів та інших мікрodefektів).

Розроблено методи модифікації дискових п'єзоелектричних перетворювачів шляхом використання поліелектродної конструкції, технології додаткових елементів та просторової енергосилової структури п'єзоелектричних перетворювачів, а також фізичні моделі перетворювачів на основі п'єзоелектричних дисків з розділеними електродами з покращеними характеристиками.

Багатофункціональний перетворювач. Розроблено багатосекційний п'єзоелектричний перетворювач, що має по п'ять електродів, розташованих на

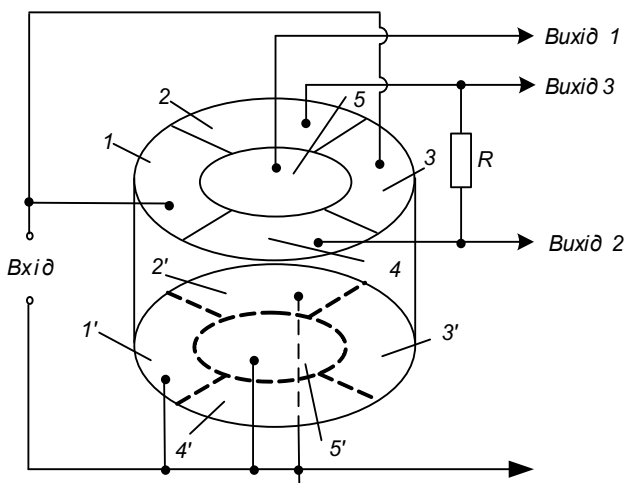


Рис. 24. Схема підключення електродів багатофункціонального перетворювача

торцевих поверхнях п'єзоелемента, причому нижні електроди є проєкціями верхніх. При цьому враховувалося не тільки розташування вектора електричного поля вихідного сигналу, але і вектора електричного поля вхідного сигналу (генератора). Якщо використовувати п'єзоелементи малої товщини, кут між векторами \mathbf{E} і \mathbf{P} може бути близьким до 90° .

Схема включення багатосекційного п'єзоелектричного перетворювача з п'єзокераміки ЦТС-19 діаметром 30 і товщиною 0,8 мм показана на рис. 24, а осцилограми сигналів на вході і виходах перетворювача показані на рис. 25.

Як видно з рис. 25, в залежності від схеми підключення електродів (тобто від взаємного розташування векторів F , P , $E_{вх}$ і $E_{вих}$), можна отримати сигнал, відповідний коливальній (рис. 25, б), диференціовальній (рис. 25, в) і інтегровальній ланці (рис. 25, г).



Рис. 25. Осцилограми сигналів п'єзоелектричного трансформатора
а) вхідний сигнал (меандр); б) вихід 1; в) вихід 2; г) вихід 3

Однак найбільш цікавими в даному випадку є те, що п'єзоелемент – пружне монолітне тверде тіло – може мати такі властивості одночасно завдяки технологічній можливості методу термовакуумного напilenня. Це дозволяє створювати багатофункціональні п'єзоелектричні перетворювачі на єдиній основі з високим ступенем інтеграції (у 3-4 рази більший за базовий елемент).

Застосування п'єзоелектричних суматорів в електро- і гідроакустиці. Суматори є одними з найпоширеніших, і необхідних вузлів при побудові елементів порівняння систем автоматики, диференціальних схем і ряду інших функціональних вузлів. Крім того, такі пристрої здатні виконувати роль сполучних елементів при компонуванні великих діелектричних твердих схем. Причому це або зовсім самостійний елемент, або частина об'єму інтегрального п'єзоелектричного пристрою, де відбувається складання або віднімання стаціонарних або нестационарних процесів.

Розроблено електроакустичний випромінювач на основі п'єзоелектричного суматора з двома системами електродів. На одну систему електродів подають електричну напругу від першого генератора, причому частоту коливань електричної

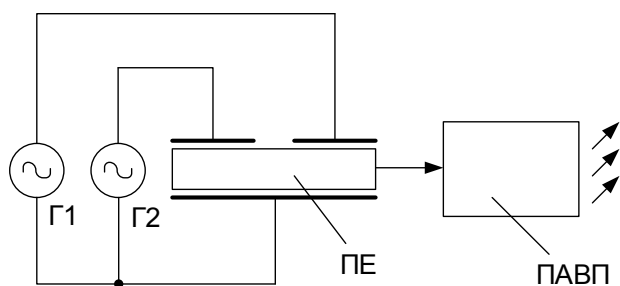


Рис. 26. Низькочастотний п'єзокерамічний випромінювач: Г1, Г2 – генератори електричних коливань; ПЕ – п'єзоелемент; ПВВП – підсилювач акустичного випромінювання п'єзоелемента

напруги цього генератора встановлюють рівною чи близькою до однієї з резонансних частот п'єзоелемента. На другу систему електродів п'єзоелемента подають напругу від другого генератора, причому частоту коливань цього генератора встановлюють також близькою до тієї ж резонансної частоти таким чином, щоб різниця між частотами коливань першого і другого генератора дорівнювала робочій частоті випромінювача (рис. 26).

П'єзоелемент з двома системами електродів при підведенні до нього сигналів від двох генераторів виконує функції суматора. Таким чином, в цьому випадку в п'єзоелементі виникають механічні коливання, пропорційні сумі вхідних електричних напруг.

Запропонований метод був перевірений експериментально. З цією метою використовувався електроакустичний перетворювач ЗП-19. Перетворювач складався з пластини зі сталі 40Х діаметром 32 і товщиною 0,15 мм. До пластини був приклеєний епоксидним компаундом п'єзоелемент діаметром 23 мм і товщиною 0,2 мм. Отриманий біморфний елемент був закріплений в корпусі з ударостійкого полістиролу. Один з електродів п'єзоелемента був розділений на три частини. До двох з них підключалися генератори електричних сигналів. Третій електрод у формі диска використовувався для контролю вихідного електроакустичного сигналу п'єзоелемента. Частота першого генератора вибиралася рівною 98,2 кГц, тобто резонансній частоті радіальних коливань п'єзоелемента ЗП-19, частота другого – 100,7 кГц. При підключенні одночасно двох генераторів ЗП-19 почав звучати на частоті 2,5 кГц – резонансній частоті коливань згину. Отже, збуджуючи перетворювач на нечутних частотах – 98,2 і 100,7 кГц, отримуємо звукову частоту 2,5 кГц. Такий же ефект можна спостерігати на і на інших частотах, якщо міняти частоту коливань одного з генераторів.

Розроблено пристрій для віброакустичної інтерференційної терапії (віброакустична фізіотерапія є одним з видів вібротерапії, при якому для лікувальних і профілактичних цілей використовується контактна дія мікрівібрацій з частотою звуку 20 Гц – 20 кГц) на основі п'єзоелектричного випромінювача (рис. 26), при цьому амплітуда вихідного інтерференційного сигналу періодично змінюючись утворює так зване биття, число якого визначається різницею частот вхідних сигналів.

Смуговий та режекторний фільтри на основі п'єзоелектричного перетворювача з розділеними електродами. Для розширення робочого діапазону п'єзоелементи можуть включатися в схеми електричних фільтрів. Найбільш часто в цих випадках використовуються схеми фільтрів нижніх і верхніх частот.

Недоліком таких перетворювачів є необхідність використання двох п'єзоелементів або п'єзоелемента і конденсатора. Для усунення цього недоліку в схемах перетворювачів можуть використовуватися п'єзоелементи з розділеними електродами. Поряд з електричними фільтрами нижніх і верхніх частот в приладобудуванні знаходять застосування смугові і режекторні фільтри.

На рис. 27 представлений перетворювач з розділеними електродами в схемі смугового фільтра.

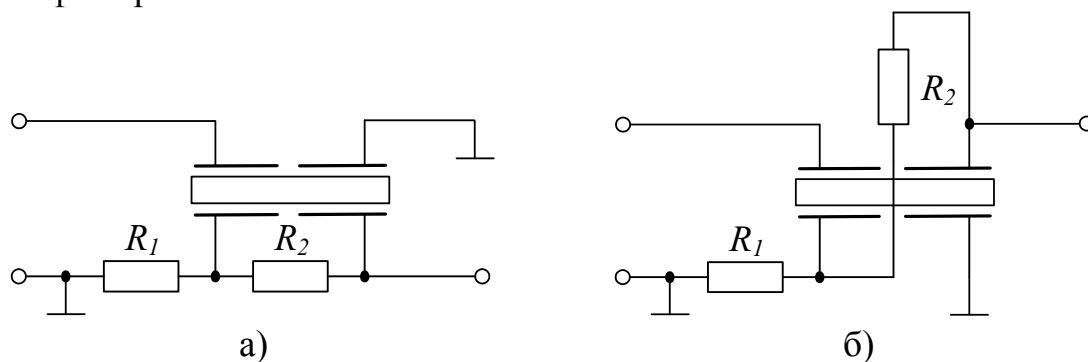


Рис. 27. Схема смугового фільтра з п'єзоелектричним трансформатором

На рис. 28 представлений перетворювач з п'єзотрансформатором в схемі режекторного фільтра.

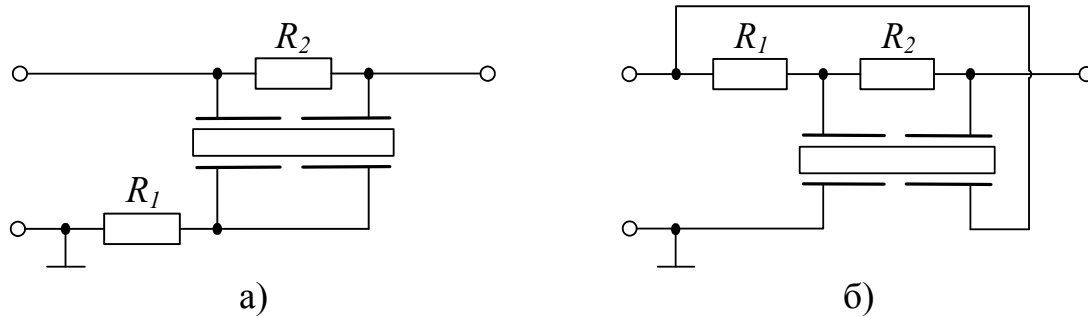


Рис. 28. Схема режекторного фільтра з п'єзоелектричним трансформатором

Були експериментально визначені амплітудно-частотна характеристика перетворювача з п'єзотрансформатором в схемі смугового фільтра (рис. 29) та режекторного фільтрів (рис. 30). Для досліджень використовувався п'єзоелектричний трансформатор на основі дискового п'єзоелектричного елемента $\varnothing 66 \times 3$ мм з п'єзокераміки ЦТС-19 з основною резонансною частотою 35 кГц.

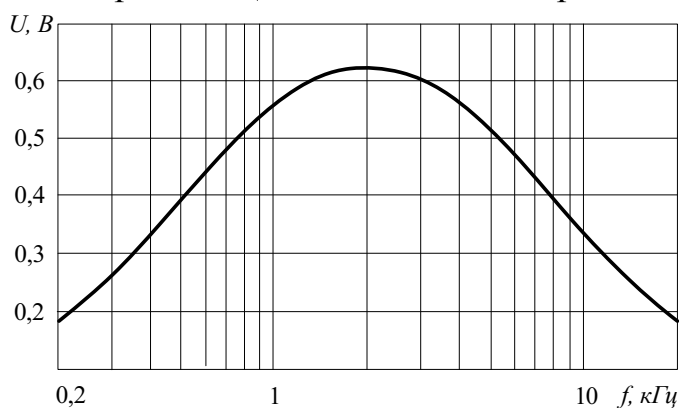


Рис. 29. Експериментальна АЧХ п'єзоелектричного перетворювача в схемі смугового фільтра
 $R_1 = 12,6$ кОм і $R_2 = 10,2$ кОм

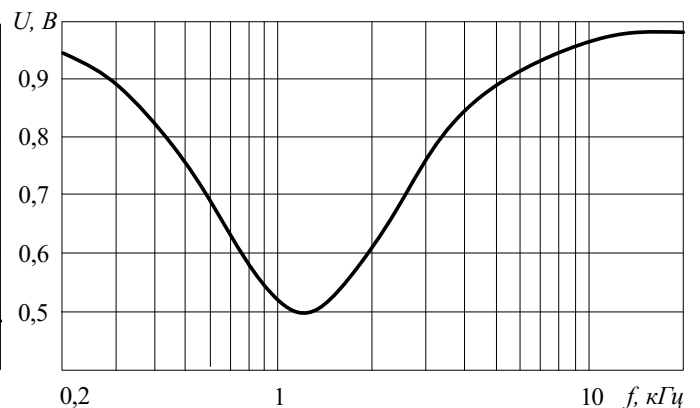


Рис. 30. Експериментальна АЧХ п'єзоелектричного перетворювача в схемі режекторного фільтра
 $R_1 = 9,5$ кОм і $R_2 = 38$ кОм

При проектуванні п'єзоелектричних перетворювачів зазвичай використовують п'єзоелемент певної форми і розмірів, з певного п'єзокерамічного матеріалу з певними електрофізичними властивостями (характеристиками). При цьому традиційно вектор поляризації \mathbf{P} паралельний вектору діючої на п'єзоелемент сили \mathbf{F} або прикладеного електричного поля \mathbf{E} , тобто перпендикулярний до електродів, які нанесені на поверхню п'єзоелемента. Такий тип перетворювача відомий і називається традиційним. Якщо вектор поляризації \mathbf{P} паралельний, наприклад, вектору поширення хвилі коливань, перетворювач називають поздовжнім, якщо перпендикулярний – поперечним. При цьому з певного п'єзоелемента можна отримати тільки один перетворювач з певними характеристиками (резонансна частота, чутливість, тощо).

Тому врахування при розробці конструкцій перетворювачів взаємного розташування векторів \mathbf{F} , \mathbf{P} і \mathbf{E} стало неординарним і незвичним рішенням. Таке взаємне розташування векторів було названо просторовою енергосиловою структурою п'єзоелемента.

Для зміни характеристик п'єзокерамічних перетворювачів, побудованих за традиційною схемою, раніше існувала майже виключно одна можливість –

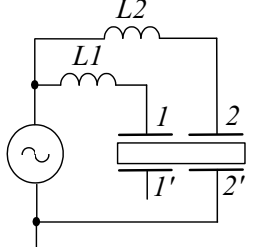
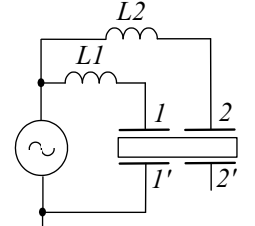
застосувати інший п'єзоелемент, іншого розміру, форми або з іншого матеріалу. Тим часом, можна очікувати зміни характеристик перетворювача при зміні його просторової енергосилової структури.

Для експериментів використовувався дисковий п'єзоелемент $\text{Ø}50 \times 1,2$ мм з п'єзокераміки ЦТБС-3, який найчастіше використовується в електроакустиці. Частота низькочастотних коливань для даного п'єзоелемента становила 3,07 кГц. На вхід п'єзоелектричного перетворювача подавалася напруга 2 В. Амплітудно-частотні характеристики знімалися за допомогою шумоміра RFT (на висоті 0,5 см). Результати вимірювань наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Результати вимірювань перетворювача з додатковими індуктивностями

№	Схема	C , нФ	L , Гн	$P_{зв}$, дБ
1		$C_{1-1'} = 22,5$	$L_1 = 0,109$	93
2		$C_{\Sigma} = 30,6$	$L_1 = 0,082$	95
3		$C_{2-2'} = 7,1$	$L_1 = 0,36$	103
4		$C_{1-2'} = 0,76$	$L = 3,34$	108
5		$C_{2-1'} = 0,74$	$L = 3,41$	108
6		$C_{1-1'} = 22,5$ $C_{2-2'} = 7,1$	$L_2 = 0,352$ $L_1 = 0,111$	109

Продовження табл. 3

7		$C_{2-2'} = 7,1$ $C_{1-2'} = 0,76$	$L_1 = 3,50$ $L_2 = 0,56$	111
8		$C_{1-1'} = 22,5$ $C_{2-1'} = 0,74$	$L_1 = 0,141$ $L_2 = 3,41$	114

Для збільшення звукового тиску на вході п'єзоелемента був створений коливальний контур з додатковою індуктивністю $L_{\text{доп}}$ і міжелектродною ємністю п'єзоелемента $C_{\text{ел}}$ (схеми 1–5, табл. 3).

На схемах 6–8 (табл. 3) збудження п'єзоелемента проводиться по двох каналах, при цьому використовуються дві індуктивності. У схемі 6 використовується традиційне підключення частин п'єзоелемента ($\alpha = 0^\circ$). У схемах 7 і 8 використовується одночасно як традиційне підключення ($\alpha = 0^\circ$) (електроди 2–2', схема 7; електроди 1–1', схема 8), так і при $\alpha \approx 90^\circ$ (електроди 1–2', схема 7; електроди 2–1', схема 8).

З табл. 3 видно, що для схем з кутом $\alpha \approx 90^\circ$ (схеми 4, 5) звуковий тиск на 5-15 дБ вище, ніж для схем з традиційним підключенням. Перетворювач за традиційною схемою з однією індуктивністю (схема 3) створює менший звуковий тиск, ніж перетворювач за традиційною схемою з двома індуктивностями (схема 6). Також дослідження показали, що для кожної конкретної конструкції п'єзоелектричного перетворювача існує оптимальне (в сенсі величини вихідного сигналу) співвідношення площ електродів.

У **висновках** сформульовано основні результати дисертаційного дослідження.

У **додатках** наводяться акти про практичне впровадження результатів дисертаційної роботи та схема побудови математичних моделей дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена **актуальна науково-прикладна проблема** створення високоефективних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування з одночасним підвищенням ступеня інтеграції та гібридизацією їх експлуатаційних властивостей шляхом створення нових та удосконалення існуючих моделей та методів синтезу дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, що повністю відповідає поставленій меті.

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі наукові результати:

1. Удосконалено математичну модель для розрахунку електричного імпедансу коливального п'єзокерамічного диска, що враховує радіальний і аксіальний

компоненти вектору зміщення матеріальних частинок п'єзокераміки, який коливається в широкому діапазоні частот. Вперше надана оцінка діелектричної проникності χ_{33}^{σ} в області низьких частот через матеріальні константи, які використовуються для опису високочастотного напружено-деформованого стану п'єзокераміки.

2. Розроблено метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, яка дозволяє в рамках експерименту на одному зразку визначити три (з чотирьох не рівних один одному) модуля пружності c_{11}^E , c_{12}^E і c_{33}^E , два (з двох не рівних один одному) п'єзомодулі e_{31} і e_{33} , і одне (з двох не рівних один одному) значення діелектричної проникності χ_{33}^E , що дозволило підвищити точність характеристик у 2-2,5 рази.

3. Показано, що п'єзоелектричний дисковий перетворювач з розділеними електродами є функціональним елементом п'єзоелектроніки з негативним зворотним електроакустичним зв'язком, та чутливість частотної характеристики п'єзоелектричного перетворювача до значень імпедансу електричного навантаження. На основі цього побудовані математичні моделі п'єзоелектричного перетворювача з кільцевим та дисковим електродами в первинному електричному колі, що дозволило отримати розрахункові залежності модуля коефіцієнта трансформації найбільш точно наближені до експериментальних даних (розходження між теоретичними та експериментальними даними не перевищували 2 – 3%).

4. Вперше запропонована схема побудови математичної моделі чотирьохсекційного дискового п'єзоелектричного перетворювача, що зберігає свою логічну конструкцію в широкому діапазоні значень числа секцій. Розглянуто особливості побудови математичних моделей багатосекційних дискових п'єзоелектричних перетворювачів, які виникають при груповому включенні секцій, можливість побудови багатofункціональних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

5. Вперше сформульована теорія невісесиметричних планарних коливань тонкого п'єзокерамічного диска, яка заснована на адекватному описі фізичного стану коливального п'єзоелектрика. Експериментальні дослідження п'єзокерамічного перетворювача з секторним електродуванням робочої поверхні диска показали, що в міру зменшення кута розкриття сектора у формуванні напружено-деформованого стану диска починають приймати участь все більше число невісесиметричних мод, і число резонансів після першого вісесиметричного радіального резонансу зростає.

6. Отримала розв'язок задача про порушення коливань поперечного вигину в біморфному п'єзоелектричному перетворювачі за рахунок прикладання різниці електричних потенціалів, яку виробляє реальний генератор з вихідним електричним опором. Побудовано конструкцію та математичну модель біморфного дискового п'єзоелектричного перетворювача з симетричним електричним навантаженням у вторинному електричному колі, що побудована з мінімальним числом спрощуючих реальну ситуацію припущень.

7. Розглянута технологія застосування додаткових елементів, яка не потребує доробок п'єзоелемента, а зміна характеристик перетворювача здійснюється за рахунок зовнішніх для п'єзоелемента електричних кіл. За допомогою енергосилового методу синтезу розроблено та досліджено п'єзоелектричні перетворювачі з розділеними

електродами, що дозволило управляти полозою частот пропускання перетворювачів та підвищити чутливість датчику тиску у 1,5-2 рази.

8. Показана перспектива використання методу термовакuumного напилення при отриманні покриттів електродів на виробках з п'єзоелектричної кераміки сорту ЦТС. Встановлено, що утворені за запропонованою технологією срібні покриття на п'єзоелектричних перетворювачах є більш рівномірними та однорідними в порівнянні з покриттями, отриманими у традиційний промисловий спосіб, а технологічна можливість методу термовакuumного напилення дозволяє створювати багатофункціональні п'єзоелектричні перетворювачі на єдиній основі чим підвищувати ступінь інтеграції у 3-4 рази.

9. Аналіз результатів АСМ досліджень поверхонь п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування дозволив встановити, що в процесі тривалої експлуатації відбувається руйнування їх поверхонь (збільшення мікронерівностей від 805...815 нм до 1130...1180 нм (поверхні отримані традиційним методом), а також від 180...210 нм до 680...710 нм (поверхні отримані методом термічного напилення у вакуумі), поява мікротріщин, відколів та інших мікродефектів).

10. Технологія додаткових елементів дозволила підвищити рівень звукового тиску для п'єзоелектричного перетворювачів з додатковою індуктивністю приблизно на 5-10 дБ у порівнянні з перетворювачами без індуктивності. Для схем з додатковими індуктивностями та з кутом $\alpha \approx 90^\circ$ звуковий тиск збільшився на 10-15 дБ порівняно зі схемами з традиційним підключенням.

11. Отримані наукові результати знайшли застосування (підтверджено актами впровадження) на підприємствах ПрАТ "Укрп'єзо" (м. Черкаси), ТОВ "Лілея" (м. Київ) та ПП "Сенсорна електроніка" (м. Черкаси). Окремі результати дисертації використовуються у навчальному процесі НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" та Черкаського державного технологічного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] О. Н. Петрищев и К. В. Базило, *Принципы и методы математического моделирования колеблющихся пьезоэлектрических элементов*, ЧП Гордиенко Е.И. Черкасы, 2019, 408 с.

Здобувачем розроблено методи математичного моделювання коливальних п'єзоелектричних елементів.

[2] О. Петрищев та К. Базило, *Основи розрахунку та проектування дискових п'єзотрансформаторів*, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019, 170 с.

Здобувачем розроблено методи розрахунку та проектування дискових п'єзоелектричних трансформаторів.

[3] О. Н. Петрищев и К. В. Базило, "Принципы и методы расчета передаточных характеристик дисковых пьезоэлектрических трансформаторов. Часть 2. Методика расчета параметров и характеристик простейшего дискового пьезоэлектрического трансформатора", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, сс. 10–23, 2015.

Здобувачем побудовано математичну модель п'єзоелектричного дискового трансформатора.

[4] О. Н. Петрищев и К. В. Базило, "Определение электрического импеданса пьезокерамического диска и его расчет в области низких частот", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, сс. 24–35, 2016.

Здобувачем побудовано математичну модель електричного імпедансу п'єзоелектричного диска в області низьких частот.

[5] С. Bazilo, A. Zagorskis, O. Petrishchev, Y. Bondarenko, V. Zaika, and Y. Petrushko, "Modelling of Piezoelectric Transducers for Environmental Monitoring", in *Proceedings of 10th International Conference "Environmental Engineering"*, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 2017, doi: 10.3846/enviro.2017.008. (**Scopus**)

Здобувачем розроблено конструкції п'єзоелектричних дискових перетворювачів з розділеними електродами та метод визначення фізичних та механічних констант п'єзокерамічних матеріалів для моніторингу навколишнього середовища.

[6] О. Н. Петрищев и К. В. Базило, "Математическая модель многосекционного пьезоэлектрического трансформатора с кольцевыми электродами во вторичных электрических цепях", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, сс. 11–24, 2017.

Здобувачем побудовано математичну модель багатосекційного дискового п'єзоелектричного трансформатора при груповому включенні секцій.

[7] O. N. Petrishchev and C. V. Bazilo, "Methodology of Determination of Physical and Mechanical Parameters of Piezoelectric Ceramics", *J. Nano- Electron. Phys.*, vol. 9, issue 3, pp. 03022-1-03022–6, 2017, doi: 10.21272/jnep.9(3).03022. (**Scopus**)

Здобувачем розроблено метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, який дозволяє в рамках одного експерименту визначити три модуля пружності, два п'єзомодулі і одне значення діелектричної проникності.

[8] О. Н. Петрищев и К. В. Базило, "Принципы и методы построения математических моделей дисковых пьезоэлектрических трансформаторов с секторными электродами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, сс. 33–44, 2017.

Здобувачем розроблено схему побудови математичної моделі дискового п'єзоелектричного трансформатора з секторними електродами в первинному та вторинному електричних колах.

[9] К. В. Базило, "Принципы расчета электрического импеданса колебательного п'єзокерамічного диска в области средних частот", *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, № 4, сс. 15–25, 2017. (**Web of Science**)

[10] О. Н. Петрищев и К. В. Базило, "Расчет электрического импеданса дискового пьезокерамического трансформатора с закороченным секторным электродом во вторичной электрической цепи", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, сс. 47–62, 2017.

Здобувачем побудовано математичну модель електричного імпедансу дискового п'єзоелектричного трансформатора з закороченим секторним електродом у вторинному електричному колі.

[11] К. В. Базило, "Дослідження електричного імпедансу п'єзоелектричного диска з секторними електродами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, сс. 41–45, 2018.

[12] К. В. Базіло, "Дослідження електричного імпедансу п'єзоелектричного диску в області середніх частот", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, сс. 100–104, 2018.

[13] С. Bazilo, "Calculation of parameters of tensely deformed state of disk piezoelements with surfaces partially covered by electrodes", *Machines. Technologies. Materials: International scientific journal*, vol. 12, issue 9, pp. 362–366, 2018.

[14] К. В. Базіло, "Дослідження впливу навантаження та розмірів електродів п'єзоелектричного диска на його амплітудно-частотні характеристики", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, сс. 15–20, 2018.

[15] К. В. Базіло, С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко, та В. В. Медяник, "Дослідження мікроелектромеханічних п'єзоелектричних структур методом атомно-силової мікроскопії", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, сс. 21–26, 2018.

Здобувачем проведено дослідження поверхні п'єзоелектричних перетворювачів методом атомно-силової мікроскопії.

[16] К. В. Базіло, "Розрахунок коефіцієнта трансформації п'єзокерамічного трансформатора з секторними електродами", *Вісник Житомирського державного технологічного університету*, № 2, сс. 179–184, 2018.

[17] К. В. Базіло, "Схема розрахунку дискового п'єзоелемента з частковим електродуванням поверхонь", *Вісник Хмельницького національного університету*, № 6, т. 1, сс. 271–281, 2018.

[18] Bazilo С., "Principles and methods of the calculation of transfer characteristics of disk piezoelectric transformers", *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, № 4, сс. 7–22, 2018. **(Web of Science)**

[19] V. V. Medianyuk, Yu. Yu. Bondarenko, С. V. Bazilo, and M. O. Bondarenko, "Research of Current-Conducting Electrodes of Elements from Piezoelectric Ceramics Modified by the Low-Energy Ribbon-Shaped Electron Stream", *J. Nano- Electron. Phys.*, vol. 10, issue 6, pp. 06012-1-06012–6, 2018, doi: 10.21272/jnep.10(6).06012. **(Scopus)**

Здобувачем встановлено закономірності впливу структурних перетворень, що відбуваються при модифікуванні струмопровідних електродів елементів із п'єзоелектричних керамік стрічковим електронним потоком низької енергії на експлуатаційні характеристики.

[20] О. М. Петрищев, та К. В. Базіло, "Побудова моделі п'єзоелектричного дискового трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі", *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія: Приладобудування, № 56(2), сс. 45–49, 2018.

Здобувачем проведено розрахунок коефіцієнта трансформації п'єзоелектричного трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі.

[21] К. В. Базіло, "Розрахунок електричного імпедансу п'єзокерамічного диску в області високих частот", *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*, № 5, сс. 9–16, 2018.

[22] О. Н. Петрищев и К. В. Базіло, "Математическое описание биморфного пьезоэлектрического элемента", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, сс. 48–63, 2019.

Здобувачем отримано рішення задачі про порушення коливань поперечного вигину в біморфному п'єзоелектричному елементі.

[23] O. Petrishchev and C. Bazilo, "Modelling of bimorph piezoelectric elements for informational systems", *Mathematical Modeling: International scientific journal*, issue 1, pp. 25–29, 2019.

Здобувачем розроблено конструкцію й особливості математичного опису біморфного п'єзоелектричного елемента.

[24] К. В. Базіло, "Дослідження характеристик біморфних п'єзоелектричних перетворювачів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, сс. 5–11, 2019.

[25] О. М. Петрищев та К. В. Базіло, "Побудова математичної моделі біморфного п'єзоелектричного трансформатора", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, сс. 5–14, 2019.

Здобувачем побудовано математичну модель біморфного п'єзоелектричного трансформатора, що працює з використанням коливань поперечного вигину.

[26] В. М. Шарапов, К. В. Базіло, Ж. В. Сотула, и В. Е. Снитюк, "Исследование пьезоэлектрических преобразователей с добавочными колебательными контурами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, сс. 35–38, 2013.

Здобувачем розроблено конструкції п'єзоелектричного перетворювача з додатковими коливальними контурами.

[27] В. М. Шарапов, К. В. Базіло, Ж. В. Сотула, А. С. Ткаченко, В. Г. Савин и И. О. Моргун, "Методы синтеза пьезоэлектрических преобразователей: метод добавочных элементов. Индуктивность + емкость", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, сс. 59–62, 2011.

Здобувачем розроблено метод синтезу п'єзоелектричних перетворювачів.

[28] В. М. Шарапов, В. В. Туз, К. В. Базіло, и А. С. Ткаченко, "Схемотехническое моделирование пьезоэлектрических преобразователей с добавочным сопротивлением", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, сс. 74–76, 2011.

Здобувачем проведено дослідження п'єзоелектричних перетворювачів з додатковим опором.

[29] V. Sharapov, A. Vladišauskas, K. Bazilo, L. Kunitskaya, and Zh. Sotula, "Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement", *Ultrasound, Kaunas, Lithuania*, No. 4, pp. 44–50, 2009.

Здобувачем розроблено метод проектування п'єзокерамічних перетворювачів з урахуванням енергосилової структури та багатофункціональний перетворювач.

[30] В. М. Шарапов, О. Н. Петрищев, К. В. Базіло, Ж. В. Сотула, и А. И. Маштапа, "Классификация пьезоэлектрических трансформаторов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, сс. 58–61, 2014.

Здобувачем розроблено класифікацію п'єзоелектричних трансформаторів на основі енергосилової структури.

[31] В. М. Шарапов, К. В. Базіло, Л. Г. Куницкая, Ж. В. Сотула, и С. А. Филимонов, "Сумматоры на основе дискового мономорфного пьезотрансформатора", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, сс. 61–64, 2009.

Здобувачем розроблено конструкції суматорів на основі дискового мономорфного п'єзоелектричного перетворювача.

[32] В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула, Л. Г. Куницкая, и К. В. Базило, "Об одном способе создания низкочастотных акустических колебаний с помощью пьезокерамического излучателя", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, № 1*, сс. 62–65, 2010.

Здобувачем розроблено метод отримання низькочастотних акустичних коливань за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів.

[33] K. V. Bazilo, O. N. Petrishchev, Yu. Yu. Bondarenko, L. G. Kunytska, and V. V. Medianik, "The research of piezoelectric electrodes for vibroacoustic interference therapy", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, № 2*, сс. 12–15, 2015.

Здобувачем розроблено конструкції та проведено дослідження п'єзоелектричних перетворювачів для віброакустичної терапії.

[34] V. Sharapov, R. Kažys, A. Vladišauskas, K. Bazilo, and D. Romanenko, "Adders on a basis of piezoceramic transformers", *Ultrasound, Kaunas, Lithuania, No. 1*, pp. 40–44, 2011.

Здобувачем розроблено конструкції та проведено дослідження п'єзоелектричних суматорів.

[35] В. М. Шарапов, К. В. Базило, Р. В. Трёмбовецкая, и В. В. Туз, "Преобразователи с пьезотрансформаторами в схемах полосовых и режекторных электрических фильтров", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, № 1*, сс. 22–26, 2015.

Здобувачем розроблено конструкції та проведено дослідження п'єзоелектричних перетворювачів в схемах смугового і режекторного фільтрів.

[36] В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула, К. В. Базило, и В. В. Самойленко, "Об эффекте возникновения изгибных колебаний в мономорфных пьезоэлементах", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, № 3*, сс. 60–62, 2011.

Здобувачем досліджено метод збудження коливань згину в мономорфному п'єзоелектричному перетворювачі.

[37] В. М. Шарапов, К. В. Базило, и Ж. В. Сотула, "Повышение уровня звукового давления низкочастотных колебаний преобразователей на основе дисковых мономорфных пьезоэлементов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, № 4*, сс. 71–73, 2011.

Здобувачем розроблено метод підвищення рівня звукового тиску низькочастотних коливань дискових мономорфних п'єзоелектричних перетворювачів.

[38] V. M. Sharapov, O. N. Petrishchev, Zh. V. Sotula, and K. V. Bazilo, "The increase of the sound pressure created by monomorphic disk piezoelements", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, № 3*, сс. 38–42, 2014.

Здобувачем розроблено метод синтезу, конструкції та проведено дослідження дискових мономорфних п'єзоелектричних перетворювачів.

[39] Ж. В. Сотула, К. В. Базило, та В. В. Туз, "П'єзоелектричні перетворювачі для роботехніки", *Вісник Хмельницького національного університету, № 1*, сс. 190–192, 2015.

Здобувачем розроблено конструкції п'єзоелектричних перетворювачів для роботехніки.

[40] K. V. Bazilo and V. V. Medianik, "The research and improvement of piezoelectric transducers for vibroacoustic physiotherapy", в *Проблеми інформатизації: матеріали другої міжнародної науково-технічної конференції*, Черкаси: ЧДТУ; Тольятті: ТДУ, 2014, с. 31.

Здобувачем проведено дослідження п'єзоелектричних перетворювачів для віброакустичної терапії.

[41] V. M. Sharapov, K. V. Bazilo, and R. V. Trembovetskaya, "Piezoelectric transducers in the schemes of bandpass and bandstop electrical filters", в *Фізика, електроніка, електротехніка "ФЕЕ-2015": Матеріали та програма наук.-техн. конф.*, Суми, 2015, с. 189.

Здобувачем розроблено конструкції дискових п'єзоелектричних перетворювачів в схемах смугового і режекторного фільтрів.

[42] K. V. Bazilo and V. V. Medianyuk, "Research of piezoelectric adders for vibroacoustic physiotherapy", в *Фізика, електроніка, електротехніка "ФЕЕ-2015": Матеріали та програма наук.-техн. конф.*, Суми, 2015, с. 196.

Здобувачем розроблено конструкції та проведено дослідження перетворювачів для віброакустичної терапії на основі п'єзоелектричних суматорів.

[43] V. V. Medianyuk and K. V. Bazilo, "Application of informational and measuring systems in vibro-acoustic therapy", в *Проблеми інформатизації: матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції*, Черкаси: ЧДТУ; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТІГН; Полтава: ПНТУ, 2015, с. 77.

Здобувачем розроблено метод синтезу п'єзоелектричних перетворювачів для віброакустичної терапії.

[44] K. V. Bazilo and V. V. Medianyuk, "Research of frequency generator for vibroacoustic therapy device", в *Фізика, електроніка, електротехніка "ФЕЕ-2016": Матеріали та програма наук.-техн. конф.*, Суми, 2016, с. 214.

Здобувачем проведено дослідження генератора частот пристрою для віброакустичної терапії.

[45] S. V. Bazilo, "Mathematical modelling of disk piezoelectric transformer with ring electrode in primary electrical circuit", в *Інформатика, математика, автоматика "ІМА-2017": Матеріали та програма наук.-техн. конф.*, Суми, 2017, сс. 233–234.

[46] О. М. Петрищев та К. В. Базіло, "Визначення електричних потенціалів у вторинних електричних колах багатосекційного дискового п'єзоелектричного трансформатора", в *Датчики, прилади та системи – 2017: тези VI Міжнародної науково-технічної конференції*, Черкаси – Миколаїв – Херсон – Лазурне, 2017, сс. 20–23.

Здобувачем розроблено схему побудови математичної моделі чотирьохсекційного дискового п'єзоелектричного трансформатора.

[47] М. А. Бондаренко, К. В. Базіло, Ю. Ю. Бондаренко, и В. В. Медяник, "Изучение микроэлектромеханических пьезоэлектрических структур методом атомно-силовой микроскопии", в *Датчики, прилады та системи – 2017: тези VI Міжнародної науково-технічної конференції*, Черкаси – Миколаїв – Херсон – Лазурне, 2017, сс. 45–48.

Здобувачем проведено дослідження упорядкованих структур, сформованих в п'єзоелектричній кераміці, методом атомно-силової микроскопії.

[48] Ю. Ю. Бондаренко, К. В. Базіло, та Л. Г. Куницька, "Підвищення ефективності електроакустичних перетворювачів шляхом зміни енергосилової структури п'єзоелемента", в *Датчики, прилади та системи – 2017: тези VI Міжнародної науково-технічної конференції*, Черкаси – Миколаїв – Херсон – Лазурне, 2017, сс. 58–60.

Здобувачем розроблено метод підвищення ефективності електроакустичних перетворювачів з енергосиловою структурою.

[49] К. В. Базіло, "Математичне моделювання п'єзокерамічного трансформатора з секторними електродами", в *Інформатика, математика, автоматика "ІМА –2018": Матеріали та програма наук.-техн. конф.*, Суми, 2018, сс. 213–214.

[50] О. М. Петрищев та К. В. Базіло, "Електричний імпеданс дискового п'єзоелектричного елемента в області середніх частот", в *Датчики, прилади та системи – 2018: тези VII Міжнародної науково-технічної конференції*, Черкаси – Херсон – Лазурне, 2018, сс. 32–35.

Здобувачем проведено розрахунок електричного імпедансу п'єзоелектричного диску в області середніх частот.

[51] К. В. Базіло, "Застосування п'єзоелектричних трансформаторів в джерелах вторинного електроживлення", в *Датчики, прилади та системи – 2019: збірник праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції*, Черкаси – Херсон – Лазурне, 2019, сс. 21–25.

[52] С. V. Bazilo, "Construction of mathematical model of bimorph piezoelectric transducer", в *Проблеми інформатизації: тези доповідей сьомої міжнародної науково-технічної конференції*, Черкаси: ЧДТУ; Харків: НТУ «ХПІ»; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТіГН, 2019, с. 97.

[53] О. М. Петрищев та К. В. Базіло, "Спосіб визначення фізико-механічних констант п'єзокерамічних матеріалів", Патент України на корисну модель №119993, 25.10.2017.

Здобувачем розроблено спосіб визначення фізико-механічних констант перетворювачів з п'єзокерамічного матеріалу.

[54] К. В. Базіло, О. М. Петрищев, Ю. Ю. Бондаренко, В. В. Тичков, та Р. В. Трембовецька, "Електроакустичний перетворювач", Патент України на корисну модель №115962, 10.05.2017.

Здобувачем розроблено конструкцію п'єзоелектричного перетворювача з додатковими елементами.

[55] В. М. Шарапов, К. В. Базіло, В. М. Заїка, О. М. Петрищев, та Ж. В. Сотула, "Електроакустичний перетворювач", Патент України на корисну модель №97758, 10.04.2015.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження п'єзоелектричного перетворювача з додатковими елементами.

[56] В. М. Шарапов, К. В. Базіло, В. М. Заїка, О. М. Петрищев, та Ж. В. Сотула, "Електроакустичний перетворювач", Патент України на корисну модель №97754, 10.04.2015.

Здобувачем розроблено конструкцію п'єзоелектричного перетворювача з додатковими індуктивностями.

[57] В. М. Шарапов, К. В. Базіло, Ж. В. Сотула, та О. С. Ткаченко, "Електроакустичний перетворювач", Патент України на корисну модель №67640, 27.02.2012.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження п'єзоелектричного перетворювача з енергосиловою структурою.

[58] В. М. Шарапов, К. В. Базіло, Ж. В. Сотула, та О. С. Ткаченко, "Електроакустичний перетворювач", Патент України на корисну модель №67639, 27.02.2012.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження п'єзоелектричного перетворювача з енергосиловою структурою.

[59] В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула, І. В. Черноший, Л. Г. Куницька, та К. В. Базіло, "Електроакустичний перетворювач", Патент України на корисну модель №56932, 25.01.2011.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження п'єзоелектричного перетворювача з додатковими елементами.

[60] В. М. Шарапов та К. В. Базіло, "Спосіб створення ультразвукових коливань за допомогою п'єзоелектричного перетворювача", Патент України на корисну модель №55516, 10.12.2010.

Здобувачем розроблено спосіб створення ультразвукових коливань.

АНОТАЦІЇ

Базіло К.В. Теорія побудови дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами для комп'ютерних систем критичного застосування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти і науки України, Черкаси, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми створення високоефективних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування з одночасним підвищенням ступеня інтеграції та гібридизацією експлуатаційних властивостей шляхом створення нових та удосконалення існуючих моделей та методів синтезу дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами.

Розроблено комплекс моделей дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами та багатосекційних дискових п'єзоелектричних перетворювачів з можливістю групового включення секцій з урахуванням негативного зворотного електроакустичного зв'язку, метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, та отримали подальший розвиток методи модифікації дискових п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування шляхом використання поліелектродної конструкції, технології додаткових елементів, просторової енергосилової структури п'єзоелектричних перетворювачів, технології термовакuumного напилення, що забезпечує можливість синтезу п'єзоелектричних перетворювачів з покращеними

характеристиками та побудови багатофункціональних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

Ключові слова: комп'ютерна система, об'єкт критичного застосування, п'єзоелектричний перетворювач, дисковий п'єзоелемент, методи модифікації, синтез, вихідні характеристики.

Базило К.В. Теория построения дисковых пьезоэлектрических преобразователей с разделенными электродами для компьютерных систем критического применения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Черкасский государственный технологический университет Министерства образования и науки Украины, Черкассы, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы создания высокоэффективных пьезоэлектрических преобразователей для компьютерных систем критического применения с одновременным повышением степени интеграции и гибридизацией эксплуатационных свойств путем создания новых и совершенствования существующих моделей и методов синтеза дисковых пьезоэлектрических преобразователей с разделенными электродами.

Разработан комплекс моделей дисковых пьезоэлектрических преобразователей с разделенными электродами и многосекционных дисковых пьезоэлектрических преобразователей с возможностью группового включения секций с учетом отрицательной обратной электроакустической связи, метод экспериментального определения материальных констант пьезокерамики, и получили дальнейшее развитие методы модификации дисковых пьезоэлектрических преобразователей для компьютерных систем критического применения путем использования полиэлектродной конструкции, технологии добавочных элементов, пространственной энергосиловой структуры пьезоэлектрических преобразователей, технологии термовакuumного напыления, что обеспечивает возможность синтеза пьезоэлектрических преобразователей с улучшенными характеристиками и построения многофункциональных пьезоэлектрических преобразователей для компьютерных систем критического применения.

Ключевые слова: компьютерная система, объект критического применения, пьезоэлектрический преобразователь, дисковый пьезоэлемент, методы модификации, синтез, выходные характеристики.

Bazilo C.V. Theory of constructing the piezoelectric disk transducers with separated electrodes for critical application computer systems. – Manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkasy, 2020.

Stable operation of computer systems, especially of critical applications, largely depends on the reliability of the operation of both the software and hardware of these computer systems. Transducers are integral elements of the hardware of computer systems, the characteristics of which largely determine the accuracy and reliability of their operation.

Until recently, the scientific and technical basis of the design and improvement of piezoelectric transducers was limited, mainly, only by changing the shape, sizes and material of the piezoelectric elements, as well as the type of excited vibrations. Existing approaches to increasing the efficiency of piezoelectric transducers, in particular, expanding the operating range, increasing the sensitivity and level of the output signal, require an inevitable compromise with the requirements for miniaturization of these transducers, the provision of which is especially important for critical applications. The main advantage of using transducers made from piezoceramic materials in computer systems is due to their special structure, which allows implementing fundamentally different schemes in one such element.

Therefore, the thesis is devoted to solving the actual scientific and applied problem of creating highly efficient piezoelectric transducers for critical application computer systems while simultaneously increasing the degree of integration and hybridizing of operational properties by creating new and improving existing models and methods of synthesis of piezoelectric transducers with separated electrodes.

The mathematical model of the electrical impedance of piezoelectric disk oscillating in a wide frequency range was improved, and on this basis, a method for the experimental determination of the material constants of piezoceramics was developed. This method, unlike the known ones, allows in one experiment to determine three elastic moduli, two piezomoduli and one value of dielectric constant to obtain reliable quantitative estimates of physical state parameters of disk piezoelectric transducers.

For the first time, mathematical models of piezoelectric transducers with ring and disk electrodes in primary electrical circuit and multisectional disk piezoelectric transducers with the possibility of group connection of sections taking into account negative electroacoustic feedback and electric load impedance values were developed. These expands the possibilities of constructing multifunctional piezoelectric transducers for critical application computer systems.

For the first time, a mathematical model of disk piezoelectric transducer with sector electrodes, constructed with a minimum number of assumptions that simplify the real situation, was developed. These allows predicting the characteristics of the transducer operating on non-axisymmetric planar oscillations.

The mathematical model of bimorph piezoelectric transducer with symmetric electrical load in the secondary circuit was improved. This, based on fundamental principles of mechanics and electrodynamics, allows to take into account the geometrical, mechanical and electrical parameters of the real design of piezoelectric transducer, the principle of which is based on the use of axisymmetric bending oscillations.

Methods for modifying disk piezoelectric transducers for critical application computer systems by using a polyelectrode design, additional element technology, spatial energy-power structure of piezoelectric transducers received further development, which makes it possible to synthesize piezoelectric transducers with improved characteristics.

Keywords: computer system, critical application object, piezoelectric transducer, disk piezoelectric element, modification methods, synthesis, output characteristics.