

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"



ДРОЗДЕНКО ОЛЕКСАНДР ІВАНОВИЧ

УДК 534.232

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКІВ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ
КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИЛАДІВ АКУСТИКИ
ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Спеціальність 05.09.08 – прикладна акустика та звукотехніка

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі акустичних та мультимедійних електронних систем.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор **Блінцов Володимир Степанович**, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), професор кафедри електроустаткування та автоматики суден;
- доктор технічних наук, професор **Карташов Володимир Михайлович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем;
- доктор технічних наук, професор **Сокол Галина Іванівна**, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, професор кафедри механотроніки.

Захист відбудеться « 12 » травня 2025 р. о « 15.00 » годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.19 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»: 03056, м. Київ, пр-т Берестейський, 37, корп. 1, ауд. 05.

Захист транслюватиметься на YouTube-каналі Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського: <https://www.youtube.com/@vchenaradakpi/streams>

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці імені Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ, проспект Берестейський, 37, та на сайті Вченої ради Університету за адресою: <https://rada.kpi.ua>.

Про дату та місце захисту громадськість проінформовано « 04 » квітня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.002.19



В.Б. Швайченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Прикладна акустика знайшла широке застосування в національному господарстві і обороні держави. Особливістю технічної акустики є те, що її електромеханічні (електроакустичні) прилади призначені для експлуатації з використанням трьох існуючих пружних середовищ – газоподібних, рідинних (є найбільш складними та агресивними) та твердих. Тому структура сучасної технічної акустики охоплює і інженерну діяльність (електротехніка, машинобудування будівництво), і мистецтво (музика), і науки про життя (медицина, фізіологія), і про Землю (геологія, океанографія). Конструювання електромеханічних приладів технічної акустики – складний процес, в результаті якого здійснюється технічна реалізація «в кожусі» принципового задуму розробників цих приладів. При цьому мають бути збереженими принцип побудови конструкцій і основні розраховані параметри приладів. Крім того при розробці конструкцій необхідно врахувати і забезпечити впливи зовнішніх і внутрішніх умов експлуатації, технології виготовлення конструкцій і кількісні оцінки цих впливів на параметри електромеханічних приладів. Зрозуміло, що все це можливо здійснити при наявності відповідного розрахункового забезпечення конструювання зазначених приладів. На жаль, в вітчизняній технічній акустиці створення такого забезпечення становило і залишається суттєвою науково-технічною проблемою, відсутність розв'язку якої значно знижує якість створюваних акустичних виробів. Тому розв'язок цієї проблеми є актуальним завданням сьогодення.

Перший підхід до розв'язку цієї проблеми на тому науково-технічному рівні, що існував на той час, було зроблено в сімдесяті роки минулого століття такими вченими як Грінченком В.Т., Улітком А.Ф., Гузем О.М., Кубенком В.Д., Шульгою О.М., Зіньковським А.П., та іншими. Але з того часу багато що змінилося в науково-технічному плані, пов'язаному з технічною акустикою. Зусиллями Грінченка В.Т., Улітка А.Ф., Шульги О.М. була встановлена зв'язаність таких фізичних полів як електричні, механічні та акустичні при перетворенні енергії в пристроях, побудованих з використанням п'єзоелектричних середовищ. При формуванні такими пристроями та системами з них акустичних полів в оточуючих пружних середовищах Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т., Лейко О.Г., Коржик О.В., Кубенко В.Д., Воскобійника В.А. та інші встановили появу і вивчили взаємодії акустичних полів, створюваних конструктивними елементами перетворювачів і систем і фізично обумовлену багатократним випромінюванням і перевідбиттям звукових хвиль цими елементами. Врахування взаємодії фізичних полів різної природи з пружним середовищем при перетворенні енергії в п'єзокерамічних середовищах, акустичних полів в пружних середовищах при їх формуванні та процесів перетворення і формування енергії, виконані в роботах Сокол Г.І., Лейка О.Г., Коржика О.В., Кубенка В.Д., Дерепи А.В., Дідковського В.С., Блінцова В.С., Найді С.А. їх колег та учнів, суттєво змінили існуючі фізичні уявлення про електромеханічні коливальні процеси в п'єзокерамічних випромінювачах різних типів. Зокрема були встановлені: залежності амплітуд коливальних швидкостей випромінювачів від характеру їх

електричного збудження; робочих частотних діапазонів та інших фізичних параметрів; перетворення одномодових механічних коливальних систем в багатомодові з появою та значним зниженням нових резонансних частот і суттєвим збільшенням амплітуд коливальних швидкостей на них. В той же час не знайшло практичного застосування цих нових знань в задачах конструювання гідроакустичних пристроїв у зв'язку з відсутністю розробленого на їх основі розрахункового забезпечення конструкторських розробок та значній теоретичній складності цих питань.

Таким чином, можливо констатувати, що на сьогодні актуальність та практична значимість роботи, що пропонується, обумовлені необхідністю створення теоретичних основ розрахунків та фізико-технічних засад конструювання електромеханічних пристроїв акустики різного призначення з урахуванням всіх аспектів і наслідків зв'язаних фізичних полів та процесів, які мають місце в цих конструкціях в умовах різноманіття пружних середовищ.

Наведені в дисертації наукові положення та результати у сукупності дозволяють сумісно і повно задовольнити вимогам сучасних комплексних проблем акустики пружних середовищ і тим самим забезпечити розв'язання важливої для держави науково-технічної проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами планами темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в межах держбюджетної конкурсної теми Міністерства освіти та науки України №2411-п "Новий ширококутовий автоматизований портативний електроакустичний апаратно-програмний комплекс з підвищеними точністю і безпечністю для ранньої диференційної аудіологічної експрес-діагностики в медицині" (номер державної реєстрації: № 0121U109609) та договору з ДП «Київський НДІ Гідроприладів» (Державний концерн «Укроборонпром») №155/16 від 22.11.2016 р., (додаткова угода №4 від 11.06.2019р.) "Ширококутові випромінюючі та приймаючі електроакустичні тракти акустичних приладів".

Мета і завдання дослідження

Метою дисертації є розробка теоретичних основ розрахунку та фізико-технічних засад конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ з урахуванням наслідків взаємодії в їх конструкціях фізичних полів різної природи при перетворенні і формуванні енергії, взаємодії з пружними середовищами які обумовлюють перехід перетворювачів зі стану одномодових в стан багатомодових та впровадження цих наслідків в практику акустики пружних середовищ.

Досягнення поставленої мети потребує розв'язку таких задач.

1. Аналіз нових знань в технічній акустиці, в частині зв'язку фізичних полів різної природи при перетворенні енергії в п'єзокерамічних середовищах, взаємодії акустичних полів при їх формуванні в оточуючих пружних середовищах і взаємного зв'язку процесів перетворення і формування енергії

та їх впливу на процес конструювання електромеханічних приладів акустики на основі багатомодових коливальних систем.

2. Аналіз експлуатаційних навантажень п'єзокерамічних приладів акустики з урахуванням наслідків дії пружних середовищ та взаємодії полів і процесів, що призводить до появи багатомодовості електромеханічних приладів акустики та розробка фізико-технічних заходів щодо їх врахування в процесі конструювання.
3. Розробка теоретичних основ та методів розрахунків механічної міцності конструкцій випромінюючих п'єзокерамічних приладів при дії на них полів різної фізичної природи та пружних середовищ.
4. Розробка теоретичних основ та методів розрахунків електричної міцності конструкцій п'єзокерамічних приладів з урахуванням дії різних фізичних факторів.
5. Розробка теоретичних основ та методів розрахунків теплової міцності конструкцій випромінюючих п'єзокерамічних приладів різних типів на основі багатомодових коливальних систем.

Об'єктом дослідження є процеси забезпечення в конструкціях електромеханічних приладів акустики їх механічної, електричної та теплової міцності конструкцій із урахуванням наслідків дії пружних середовищ та взаємодії фізичних полів і процесів, що виникають при перетворенні і формуванні енергії цими приладами.

Предметом дослідження є електромеханічні прилади акустики пружних середовищ з акцентом на рідинні, особливо морські, дія яких є найбільш складною і агресивною.

Методами дослідження є методи математичної фізики, обчислювальні методи та методи експериментальних визначень характеристик матеріалів та елементів конструкцій. При цьому наукові положення і висновки, що представлені в дистанційній роботі, сформульовані на підставі застосування методів постановки і розв'язання задач стаціонарної гідроелектропружності, рівнянь дифузії молекул пару в рідині і через границю розподілу рідини і середовищ, рівнянь теплопровідності Фур'є, методу розділення змінних та методу редукції.

Достовірність отриманих результатів підтверджується збігом теоретичних даних з результатами експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Запропоновано принципово новий підхід в розробці конструкцій електромеханічних приладів акустики пружних середовищ, що полягає в розгляді цих приладів як частини складної коливальної системи «електромеханічний прилад акустики – пружне середовище». Це дозволило встановити, що конструкції приладів стають багатомодовими, мають нижчі діапазони робочих частот, а величини їх механічних та електричних навантажень в кілька разів перевищують аналогічні значення порівняно з одномодовими конструкціями.

2. Вперше показано, що вид електричного збудження значно впливає на характеристики конструкцій багатомодових приладів, зокрема на положення резонансних частот та на величини їх електричних і механічних навантажень. Для частотно-незалежних, частотно-залежних та змішаних видів збудження значення цих величин відрізняються в 2-4 рази.
3. Вперше встановлено, що у випадку електричного збудження багатомодових приладів частотно-незалежними електричними сигналами, основним параметром, який визначає їх конструкцію, є механічна складова міцності. Це обумовлено збільшенням механічних навантажень в 3-6 разів в області низьких частот порівняно з одномодовими приладами.
4. Вперше встановлено, що у разі електричного збудження багатомодових приладів частотно-залежними електричними сигналами, основним параметром, який визначає їх конструкцію, є електрична складова міцності. При цьому механічна складова забезпечується заданням допустимих значень коливальної швидкості, навіть на межі механічної міцності матеріалів приладів на розрив.
5. Вперше отримано вирази для розрахунку величин механічних навантажень конструкцій і визначено їх кількісні значення з врахуванням багатомодовості приладів акустики. В результаті цього здійснено обґрунтований кількісний вибір елементів конструкцій з метою забезпечення їх статичної і динамічної міцності для випадку, коли резонансні частоти коливальних систем приладів знижуються більше, ніж у 2 рази, а механічні навантаження збільшуються більше, ніж у 2 рази порівняно з одномодовими конструкціями.
6. Вперше визначені фізичні фактори, які впливають на електричну міцність конструкцій електромеханічних приладів та шляхом розв'язку диференціальних рівнянь дифузії отримані аналітичні співвідношення для знаходження її величини в залежності від: концентрації парів рідини; відносної вологості; питомого електричного опору, температури та робочої частоти п'єзокерамічних та полімерних електроізоляційних матеріалів; коефіцієнтів дифузії, проникливості та поглинання рідини конструкційними матеріалами. Це дозволило отримати кількісні значення електричної міцності конструкцій на різних етапах їх конструювання.
7. Вперше на основі розв'язку диференціальних рівнянь теплопровідності Фур'є отримано та за допомогою комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів підтверджено аналітичні залежності температур та часу розігріву конструкцій приладів від типу п'єзокераміки та інших конструкційних матеріалів, температури пружних середовищ, а також варіантів побудови цих конструкцій. Це дозволяє зменшувати температуру і збільшувати час розігріву приладів під час експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів

1. Процес розробки конструкцій п'єзокерамічних акустичних приладів отримав можливості вибору характеру електричного збудження випромінюючих

приладів, виходячи з вимог щодо їх механічної, електричної міцностей та допустимих теплових навантажень в залежності від умов пружних середовищ та існуючих технічних можливостей практичної реалізації вибраного варіанту електричного збудження;

2. Конструювання п'єзокерамічних акустичних приладів забезпечено методами і методиками щодо кількісного визначення значень механічної міцності розроблюваних конструкцій. Завдяки цьому є можливість шляхом зіставлення результатів розрахунків механічної міцності здійснювати різні варіанти побудови конструкцій як за вибраними схемами побудови, так і за окремими елементами конструкцій;
3. Для процесу розробки конструкцій п'єзокерамічних акустичних приладів створене розрахункове забезпечення в частині електричної міцності конструкцій приладів. Завдяки цьому є можливість порівнювати між собою варіанти конструктивної реалізації приладів щодо електричної міцності без їх виготовлення та змінювати в процесі конструювання такі складові конструкцій як тип вибраного матеріалу, розміри деталей та інше, змінюючи при цьому значення електричної міцності конструкції приладу в 2-4 рази;
4. Створене розрахункове забезпечення щодо визначення теплових навантажень конструкцій п'єзокерамічних акустичних приладів, завдяки цьому є можливість в широких межах здійснювати зміни схеми побудови конструкцій приладів з метою пошуку раціональних варіантів відводу тепла в залежності від типу пружного середовища, вибору застосованих конструкційних матеріалів, розмірів деталей тощо. Значення випромінюваної потужності може змінюватись при цьому в 1,5-2 рази без збільшення теплових навантажень конструкцій.
5. Результати дисертаційної роботи впровадженні
 - в практику проектних робіт в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідропріладів» (Державний концерн «Укроборонпром») при виконанні договору №155/16 від 22.11.2016 р., (додаткова угода №4 від 11.06.2019р.) "Ширококутні випромінювачі та приймаючі електроакустичні тракти акустичних приладів".
 - в навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при підготовці бакалаврів, магістрів та аспірантів зі спеціальності 171 «Електроніка» з дисциплін «Електроакустичні перетворювачі», «Акустичні антени», «Конструювання акустичних приладів та систем», «Сучасні тенденції в електроакустичних технологіях»;

Всі впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджені відповідними актами.

Особистий внесок здобувача.

В роботі узагальнено результати багаторічних досліджень, виконаних автором самостійно і висвітлених у 2 самостійних працях. Роботи, виконані із співавторами, наведені в переліку публікацій. При цьому із них безпосередньо здобувачу належать

вибір та обґрунтування напрямку досліджень, постановка задач на різних етапах роботи, аналіз та інтерпретація одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідались на 11 міжнародних науково-практичних конференціях.

Публікації

За результатами досліджень опубліковано 37 наукових праць, у тому числі:

- 1 монографія (2 розділи у колективній монографії);
- 22 статі у наукових періодичних фахових виданнях, з них 5 статей у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз SCOPUS та Web of Science Core Collection, віднесених до третього квартилю Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank.
- 2 патенти України на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу;
- 1 патент України на корисну модель;
- 11 тез та доповідей на наукових конференціях.

Структура і об'єм дисертації

Дисертація складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 341 сторінку, 85 рисунків, список використаних джерел з 198 найменувань займає 24 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульована мета і задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведені дані щодо їх апробації та впровадження.

Дисертаційна робота є узагальнюючою працею і структурована з врахуванням наступних напрямків:

- визначення з урахуванням нових знань перспективних тенденцій розвитку підходів до конструктивної реалізації вимог до електромеханічних приладів акустики пружних середовищ, фізичне осмислення та їх узагальнення відносно приладів різних типів;
- розробка розрахункових моделей, розв'язок задач, створення методів та методик і визначення на їх основі кількісних параметрів механічної, електричної та теплової міцності конструкцій електроакустичних приладів з урахуванням типу пружного середовища, схем та детальних елементів побудови, технології виготовлення та умов експлуатації;
- фізичний аналіз отриманих результатів на етапі конструювання відносно різних варіантів конструктивної реалізації заданого електромеханічного акустичного приладу, визначення технічних пропозицій та їх впровадження.

Результати роботи за зазначеними напрямками викладені в розділах дисертації і визначають загальний сучасний стан забезпечення проектних робіт на етапі конструювання електроакустичних приладів і систем для різних пружних середовищ. Фактично проблематика дисертаційної роботи охоплює широке коло сучасних науково-практичних комплексних задач акустики пружних середовищ та створює теоретичні і фізико-технічні засади використання різних фізико-технічних явищ, пов'язаних з конструкторською реалізацією, технологіями виготовлення і умовами експлуатації та їх впливом на параметри конструкцій електроакустичних приладів різного призначення, особливо морських.

Розділ 1 присвячений аналізу фізичних проблем обмеження рівня випромінюваної акустичної потужності конструкціями електроакустичних приладів в різних пружних середовищах. Випромінювання акустичної потужності пов'язане із взаємодією трьох фізичних полів – механічного, електричного і акустичного та особливостей рідинного середовища (кавітація), в якому працюють ці прилади. Результатом взаємодій є також поява теплового поля конструкцій електромеханічних приладів.

Природньо, що кожне з цих полів має в пружному середовищі свої фізичні фактори, які обмежують випромінювання максимальної акустичної потужності. Всі вони пов'язані з характеристиками міцності по кожному з цих полів. При цьому слід прийняти до уваги наступні два моменти. Перший з них пов'язаний з тим, що до останнього часу було майже відсутнє розрахункове забезпечення конструювання електроакустичних приладів особливо для рідин. Другий момент пов'язаний з результатами новітніх досліджень, виконаних Грінченком В.Т., Вовком І.В., Маципуною В.Т., Лейком О.Г., Коржиком О.В., Дідковським В.С., Дерепую А.В.

Електроакустичні прилади виконують дві функції – перетворення енергії та її формування в оточуючому пружному середовищі. Кожна з них має свої особливості. В п'єзокерамічних приладах особливість перетворення енергії полягає у взаємному зв'язку електричних, механічних і акустичних полів. Особливістю формування полів в пружних середовищах є акустична взаємодія полів, випромінених і розсіяних елементами приладів, обумовлена багатократним перевідбиттям звукових хвиль. Третьою особливістю є взаємодія процесів перетворення та формування енергії. В останній час при визначенні акустичних полів конструкцій електроакустичних приладів стало можливим враховувати акустичну взаємодію полів. Така ж можливість з'явилась і в результаті досліджень по взаємному зв'язку трьох фізичних полів при перетворенні енергії.

Нові знання суттєво змінили уявлення конструкторів електроакустичних приладів про перебіг коливальних процесів в п'єзокерамічних акустичних приладах, про можливості випромінювання максимальних акустичних потужностей в залежності від типу пружного середовища і про пов'язані з ними проблеми міцності конструкцій приладів і дозволили зробити наступні висновки.

По-перше, перебіг коливальних процесів та максимальна випромінювана акустична потужність, а відтак, і міцність конструкцій електроакустичних приладів залежить від характеру організації їх електричного збудження.

По-друге, можливі три підходи до створення електричного збудження, що забезпечує випромінювання максимальної акустичної потужності при збереженні міцності конструкцій.

По-третє, врахування взаємного зв'язку між фізичними полями при перетворенні енергій, акустичного зв'язку між елементами приладів і взаємного впливу процесів перетворення і формування енергії суттєво змінили і ускладнили проблему міцності конструкцій електроакустичних приладів, особливо для рідинних (морських) середовищ. І це ускладнення повинно бути обов'язково враховано при розробці конструкцій приладів.

По-четверте, з'явилась необхідність в методичному забезпеченні щодо чисельних розрахунків характеристик всіх задіяних при випромінюванні звуку фізичних полів і зв'язаних з ними міцностей конструкцій з врахуванням всіх видів взаємодій.

Розглянута задача про випромінювання звуку довільною системою випромінювачів, утвореною зі скінченної кількості N кругових п'єзокерамічних циліндричних випромінювачів з окружною поляризацією. Поздовжні осі випромінювачів паралельні між собою та довільним чином розташовані у просторі. Кожен випромінювач є круговою циліндричною оболонкою із середнім радіусом r_{0s} та товщиною h_s , система випромінювачів утворена з $M^{(s)}$ п'єзокерамічних елементів-призм, жорстко склеєних між собою в єдину конструкцію. Внутрішня порожнина випромінювачів може бути вакуумована, заповнена повітрям або рідиною. Кожен випромінювач системи збуджується на нульовій моді коливань електричною напругою $\Psi^{(s)} = \Psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$, де ω – кругова частота збудження випромінювачів. Напруги збудження $\Psi_0^{(s)}$ обрані таким чином, що всі випромінювачі в антені коливаються з однаковою швидкістю $\dot{W}^{(s)}$ і ця швидкість дорівнює гранично допустимій коливальній швидкості $\dot{W}^{(s)} = \dot{W}_{0, \max}$, вище якої настає механічне руйнування випромінювачів. Випромінювачі вважаємо нескінченно довгими. Внутрішні порожнини випромінювачів заповнені пружними середовищами із густиною ρ_s та швидкістю звуку c_s , $s = 1, \dots, N$. Систему випромінювачів розташовано в ідеальному середовищі, що стискається, з хвильовим опором ρc .

У математичному плані проблема чисельного визначення значень міцності конструкцій електроакустичних приладів з урахуванням наведених вище взаємодій полів і процесів вирішується шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь, що складено з:

- рівняння Гельмгольца, що описує рух пружних середовищ усередині та поза кожним s -м випромінювачем системи:

$$\Delta \Phi^{(s)} + k_s^2 \Phi^{(s)} = 0; \quad s = 1, \dots, N$$

- рівнянь руху, наприклад, тонкої п'єзокерамічної оболонки, зокрема з окружною поляризацією s -го випромінювача системи, у переміщеннях:

$$\begin{aligned} (1 + \beta^{(s)}) \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial W^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} &= \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial t^2}; \\ -\frac{\partial U^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left(\frac{\partial^3 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - W^{(s)} + \frac{e_{33}^{(s)} r_{0s}}{C_{33}^{E(s)}} E_\varphi^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} &= \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 W^{(s)}}{\partial t^2}. \end{aligned}$$

- рівнянь вимушеної електростатики для п'єзокераміки s -го випромінювача системи:

$$\vec{E}^{(s)} = -\text{grad } \Psi^{(s)}; \text{div } \vec{D}^{(s)} = 0.$$

Позначено Δ - оператор Лапласа; $\Phi^{(s)}$ – потенціал коливальної швидкості s -го випромінювача; k і k_s – хвильові числа зовнішнього та внутрішнього середовищ s -го випромінювача; $U^{(s)}$ і $W^{(s)}$ – окружна та нормальна складові вектора зміщень точок серединної поверхні s -го випромінювача; $\beta^{(s)} = \frac{h_s^2}{12 r_{0s}^2} \left(1 + \frac{e_{33}^{2(s)}}{C_{33}^{E(s)} \epsilon_{33}^{s(s)}} \right)$;

$\alpha^{(s)} = \frac{r_{0s}^2}{C_{33}^{E(s)}}$; $\gamma^{(s)}$ - густина матеріалу s -ї оболонки; $q_r^{(s)}$ - зовнішнє радіаційне навантаження s -го випромінювача; $C_{33}^{E(s)}$, $\epsilon_{33}^{s(s)}$, $e_{33}^{(s)}$ – модулі пружності при нульовій електричній напруженості, діелектрична проникність при нульовій деформації та п'єзоконстанта s -го випромінювача відповідно; $\vec{E}^{(s)}$ і $\vec{D}^{(s)}$ - вектори напруженості та індукції електричного поля s -го випромінювача.

Факторами, що обмежують енергетичну ефективність акустичної системи, є механічна, електрична міцності їх конструкційних елементів. Тому виникає необхідність при розробці конструкцій приладів спільного врахування впливу первинних електричних і механічних обмежуючих фізичних факторів. При цьому із фізичних уявлень зрозуміло, що існують три можливі підходи.

Перший підхід, який в наш час набув найбільшого поширення в зв'язку з простотою своєї технічної реалізації електронної частини акустичних систем і приладів, полягає у збудженні всіх випромінювачів системи однаковою електричною напругою, що дозволяє уникнути проблем з електричною міцністю системи. Однак, через наявність взаємодії випромінювачів в системах по акустичному полю виникають суттєві проблеми з механічною міцністю п'єзокерамічних випромінювачів. Вони обумовлені переходом випромінювачів із одномодового стану в багатомодовий та появою значної (більш ніж в 2 рази) різниці в амплітудах коливальних швидкостей випромінювачів у складі системи. Ці відмінності не дозволяють повністю реалізувати потенційні можливості системи з випромінюваної потужності, оскільки їх окремі випромінювачі набувають через акустичну взаємодію коливальну швидкість, гранично допустиму або більшу за критерієм їх механічного руйнування.

Другий підхід пов'язаний із забезпеченням такого електричного збудження елементів системи, за яким всі її випромінювачі матимуть однакоvu коливальну швидкість.

Третій підхід полягає у тому, щоб забезпечити таку електричну напругу, при якій всі випромінювачі системи будуть працювати в режимі, близькому до оптимального.

швидкість. Цей підхід забезпечує задану механічну міцність випромінювачів системи, однак його технічна реалізація пов'язана з необхідністю збудження випромінювачів або від електронних генераторів з нескінченною електричною потужністю, або від генераторів, які формують спеціальні частотнозалежні амплітудно-фазові розподіли для кожного випромінювача системи.

Можливий і третій підхід, коли здійснюють пошук таких електричних збуджень випромінювачів системи, при якому забезпечуються прийнятні рівні і механічної, і електричної міцностей елементів її конструкцій.

Розв'язок таких задач здійснюють методом зв'язаних полів в багатозв'язних в областях і зводиться до розв'язку методом редукції нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

На рис. 1, а для триелементної системи наведені амплітуди коливальної швидкості п'єзокерамічних перетворювачів при збудженні їх в рідинному пружному середовищі однаковою електричною напругою (перший підхід); на рисунку 1, б наведені отримані Грінченком В.Т. і його учнями амплітуди і фази електричних збуджень при однакових коливальних швидкостях перетворювачів в триелементній системі в рідині.

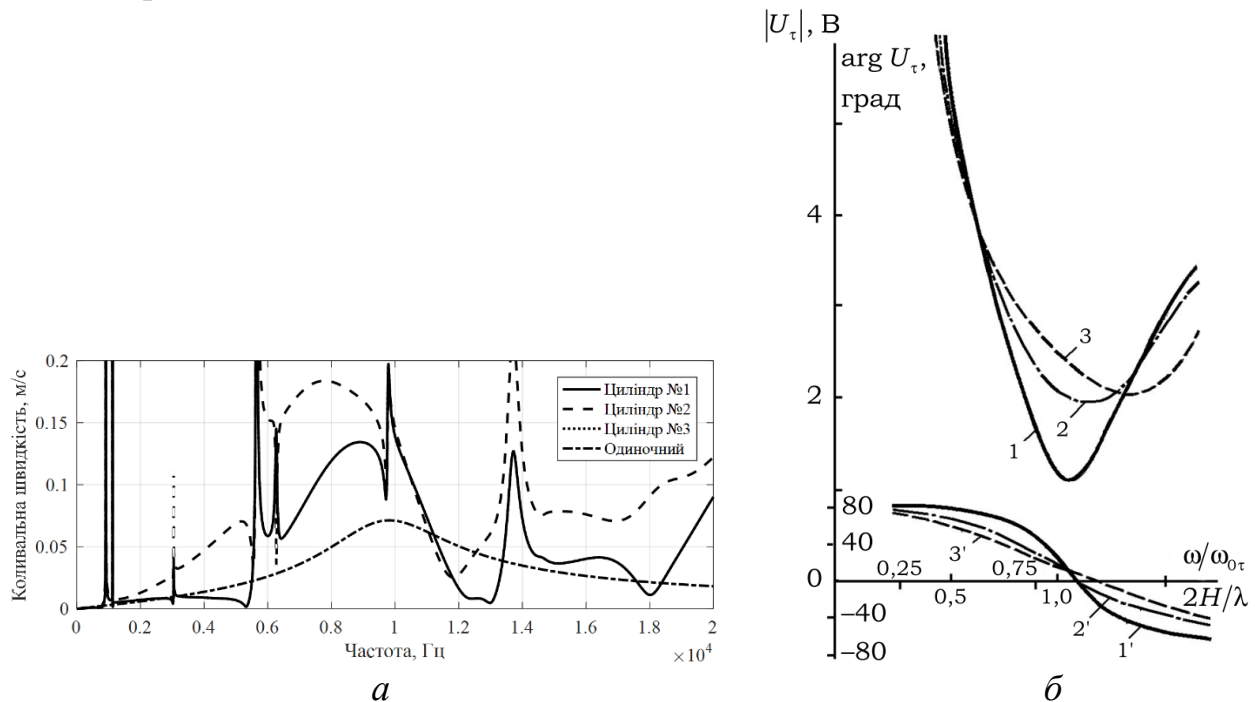


Рис. 1. Приклад збудження п'єзокерамічних перетворювачів однаковою електричною напругою (а) та забезпечення однакової коливальної швидкості поверхні перетворювача (б).

Їх аналіз свідчить, що в перспективних конструкціях п'єзокерамічних акустичних приладів механічна і електрична міцність конструкцій мають бути в кілька разів більшими порівняно з тими, коли при розрахунках діючих фізичних полів не враховувався зв'язок між ними при конструюванні приладів.

У зв'язку з наведеним, в наступних розділах викладені результати досліджень, одержаних по розрахунковому забезпеченню конструювання акустичних приладів в

частині механічної, електричної та теплової міцностей. При цьому пріоритет надано рідинному (морському) пружному середовищу.

В розділі 2 проведено аналіз сучасних фізико-технічних проблем конструкторсько-технологічної реалізації електроакустичних приладів з урахуванням перспективних вимог до їх параметрів та умов експлуатації. Для пружних рідинних середовищ, а саме морських, як найбільш складних і агресивних визначені основні експлуатаційні навантаження та фізично обґрунтовані підходи до їх вирішення для підводних електроакустичних приладів різного призначення. До них віднесені: зовнішній статичний тиск і конструкторські способи нейтралізації його впливу; довготривала механічна міцність конструкцій електромеханічних приладів і конструкторські рішення щодо її забезпечення; довготривала електрична міцність конструкцій електроакустичних приладів і конструкторські рішення щодо її забезпечення; тепла міцність конструкцій випромінюючих електроакустичних приладів. Наведений аналіз дозволяє створити нові підходи до комплексного спільного розв'язання конструкторсько-технологічної реалізації підводних електроакустичних приладів.

Виконано постановку і розв'язок задач пошуку нових підходів до конструювання перспективних електроакустичних приладів різного призначення, які відрізняються між собою саме цими призначеннями, діапазонами робочих частот, умовами експлуатації, та як великим різноманіттям гідроакустичних технологій, так і технологічних процесів виготовлення конструкцій приладів. До таких підходів віднесені:

- конструювання антен з жорсткими і гнучкими несучими каркасами;
- модульний принцип побудови конструкцій антен;
- використання принципу побудови конструкцій антен з керуванням їх розмірами і формою;
- суміщення в одному об'ємі конструкцій різних антен як за призначенням, так і за формою;
- створення решітчастості конструкцій підводних антен.

Визначені фізична суть та технічні особливості застосування наведених підходів при розробці конструкцій підводних електроакустичних приладів різного призначення, їх позитивні і негативні наслідки. Наведені приклади побудови конструкцій приладів з використанням викладених підходів.

Розділ 3 присвячений механічній міцності конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних приладів. В процесі експлуатації конструкції електроакустичних приладів зазнають дію як статичних, так і динамічних (знакозмінних) навантажень. Для збереження міцності конструкцій приладів необхідно, щоб робочі навантаження σ_{Σ} , що створюються всіма видами впливу, не перевищували руйнівних значень σ_{zp} , та ще й з певним коефіцієнтом запасу на надійність. В загальному випадку сумарні механічні напруження, які виникають в конструкціях вузлів та приладів, визначаються виразом:

$$\sigma_{\Sigma} = a_1\sigma_{\epsilon} + a_2\sigma_N + a_3\sigma_{арм} + a_4\sigma_T + a_5\sigma_{ск} + a_6\sigma_y ,$$

де $a_1, a_2, \dots, a_6$ – коефіцієнти приведення відповідних напружень до статичних; σ_z – механічні напруження, що виникають під дією зовнішнього (для рідин – гідростатичного) тиску; σ_N – механічні циклічні напруження, які виникають при коливаннях активного елемента на одній з власних форм при випромінюванні акустичної потужності; $\sigma_{арм}$ – напруження, які створюються в активному елементі при його зміцненні (армуванні); σ_T – температурні напруження, які обумовлені зміною температури експлуатації приладу; $\sigma_{ск}$ – напруження, які створюються в конструкції електроакустичного приладу при його складанні; σ_y – механічні напруження, які виникають в конструкції при імпульсних впливах.

Величина статичних σ_z механічних напружень, що виникають в конструкціях електроакустичних приладів під дією зовнішнього тиску p_z , визначається виразом $\sigma_z = A_i p_z$, де A_i – коефіцієнт, що визначається способом закріплення та видом напруженого стану конструкції. Вплив прийнятих при розробці конструкції приладу конструкційних і технологічних рішень на статичну міцність конструкції приладу під дією зовнішнього тиску демонструє рис. 2.

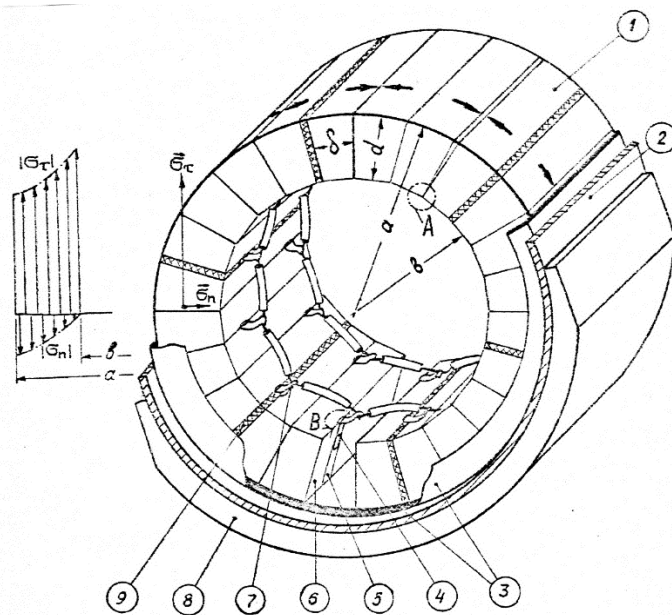


Рис. 2. Циліндричний прилад силової конструкції. 1 – активний елемент; 2 – стальний бандаж; 3 – електроізоляційний шар; 4 – монтажний пелюсток; 5 – канавка; 6 – грань призми; 7 – підвісний проводний монтаж; 8 – акустичний екран; σ_τ і σ_n – тангенціальні і нормальні напруження в активному елементі; стрілки показують напрям поляризації призм.

Статичні механічні напруження під дією зовнішнього тиску p_z в активному елементі визначені у вигляді:

$$\sigma_{\tau}^{(\delta)} = \left[1 + \left(\frac{b}{\rho} \right)^2 \right] \frac{p_z + p^{(\delta)} \left(1 - \frac{p_z}{p_0} \right)}{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2};$$

$$\sigma_n^{(\delta)} = \left[1 - \left(\frac{b}{\rho} \right)^2 \right] \frac{p_z + p^{(\delta)} \left(1 - \frac{p_z}{p_0} \right)}{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2},$$

де $p_0 = p^{(\delta)} \left[1 + \frac{c_{\delta}}{c_k} + c_{\delta k} \right]$ – зовнішній тиск, при якому розтягнутий армуванням бандаж прийме розміри, які він мав до армування; $p^{(\delta)}$ – тиск, що створюється армуючим бандажем; c_{δ} , c_k , $c_{\delta k}$ – гнучкості бандажу, кераміки та підбандажного шару, які відповідно дорівнюють:

$$c_{\delta} = \frac{r_{сер(\delta)}}{2\pi(HE_{Юd})_{\delta}}; \quad c_k = \frac{r_{сер(k)}}{2\pi(HE_{Юd})_k}; \quad c_{\delta k} = \frac{1}{2\pi(HKr_{сер})_{шару}}.$$

Тут $E_{Ю}$ – модуль Юнга матеріалу; K – модуль об'ємної пружності матеріалу підбандажного шару $r_{сер}$ – середній радіус бандажа (б) та п'єзокераміки (к). В реальних конструкціях $\frac{b}{a} = 0,8 \div 0,97$, тому $\sigma_z \gg \sigma_n$ і для практично значимих глибин роботи підводних приладів небезпечними є лише тангенціальні напруження.

Механічні динамічні напруження σ_N утворюється при роботі конструкцій електромеханічних приладів в режимі випромінювання звуку і залежать від характеру режиму випромінювання, конструктивного виконання приладу та його вузла армування, характеру коливань, параметрів коливальної системи та технології складання приладу. Чим більша питома акустична потужність яку випромінює електроакустичний прилад, тим більші динамічні напруження σ_N утворюється в його активному елементі. В загальному вигляді випромінювана потужність визначено виразом:

$$W_a = \frac{1}{2} \alpha (\rho c)_p S v_m^2,$$

де α – безрозмірний коефіцієнт активної складової опору випромінювання приладу; $(\rho c)_p$ – питомий хвильовий опір пружного середовища; S – площа випромінюючої поверхні; v_m – амплітуда коливальної швидкості приладу. При цьому $v_m = \frac{\sigma_N}{(\rho c)_k}$, де $(\rho c)_k$ – питомий хвильовий опір активного матеріалу (п'єзокераміки).

Фізично картина динамічних руйнувань конструкцій п'єзокерамічних електромеханічних приладів виглядає наступним чином. П'єзоелектрична кераміка відноситься до крихких матеріалів з великою кількістю випадкових дефектів. Останні утворюються при спіканні і є концентраторами напружень. При тривалій дії динамічних циклічно змінних напружень в об'ємах п'єзокерамічних елементів

накопичуються випадкові ушкодження (порожини, тріщини, сколи, пори, конструктивні пази). Вони залежать від діючих в цих об'ємах напружень і випадкових значень їх меж міцності. Аналіз роботи активних елементів електроакустичних приладів показує, що на сьогодні в загальному вигляді розрахункова оцінка їх міцності практично неможлива. Експериментальні дослідження зразків п'єзокераміки показали (рис. 3), що їх циклічна міцність σ_N суттєво залежить:

- 1) від кристалічної структури зразків та наявності в них різних концентраторів напружень і розмірів (S) дефектів: порожнин, тріщин, сколів, пор, конструктивних пазів;
- 2) від масштабного ефекту, який характеризується визначальним розміром $L = 2\pi D_{вн}$, де $D_{вн}$ – внутрішній діаметр активного елемента

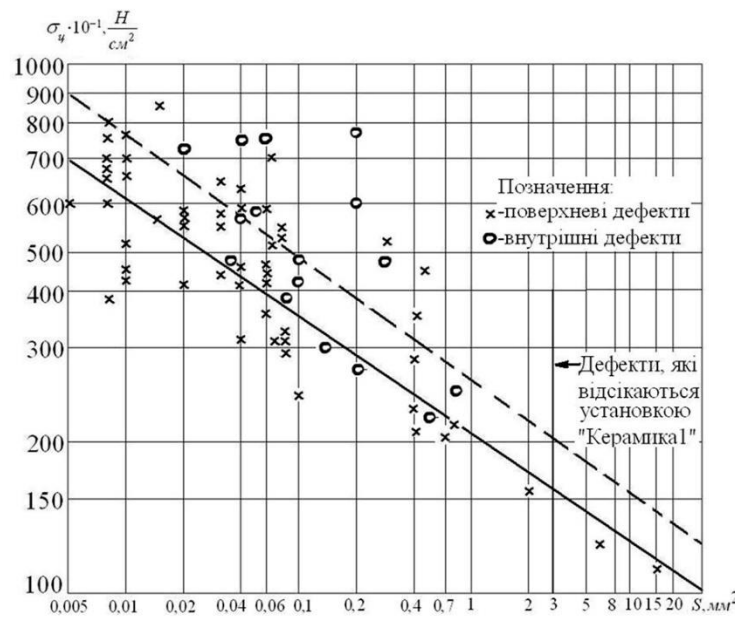


Рис. 3. Експериментальні дослідження циклічної міцності п'єзокерамічних елементів

Армування є одним із основних заходів збільшення динамічної міцності конструкцій електроакустичних приладів. Його поява обумовлена значною різницею міцності п'єзокераміки на розтягування та стиснення.

Реальна величина коефіцієнта зміцнення активного елемента може суттєво залежати від специфіки вибраного способу армування. Армування активних елементів циліндричних приладів здійснюють або накладенням розігрітого бандажу на шар полімерного матеріалу (гетинаксу або гуми), або навивкою склонтки або металевої струни. Армування стержневих приладів здійснюють накладенням на активні елементи болтових стяжок. Пластинчасті прилади армують шляхом створення статичних згинаючих напружень за допомогою елементів конструкцій. В таблиці 1 наведено дані, які дають уявлення про параметри основних способів армування.

Таким чином, одним з найефективніших засобів забезпечення тривалої циклічної міцності активних елементів випромінюючих електроакустичних приладів

є створення в них попередніх стискуючих напружень $\sigma_m = \sigma_{арм}$ (напружень армування).

Таблиця 1

№ п/п	Найменування способу армування	Стискуючі напруження			
		тип активного елемента	величина $\sigma_{стис}$, $\times 10^5$ Па	розкид $\frac{3\sigma(\sigma_{стис})}{\bar{\sigma}_{стис}}$, %	релаксація, %
1.	Навивка склонитки	Циліндричний	до 500	до 20	до -20
2.	Навивка струни на гетинакс	Циліндричний	до 500	до 20	до -20
3.	Гаряче армування через гетинакс	Циліндричний	до 200	до 30	до -20
4.	Гаряче армування через гуму	Циліндричний	до 200	до 50	до -70
5.	Болтова стяжка	Стержневий	до 500	до 20	до -10
6.	Згин пластинки	Пластинчастий	до 500	до 30	до -10

Зв'язок між амплітудою напружень робочого циклу і інтервалом значень армуючих напружень встановлює діаграма граничних циклів навантаження п'єзоелементів, зображена на рис. 4. Встановлено, що застосування армування в конструкціях п'єзокерамічних приладів акустики дозволяє збільшити динамічну механічну міцність їх конструкцій в залежності від типу приладу не менш ніж (1,8 – 2,2) рази

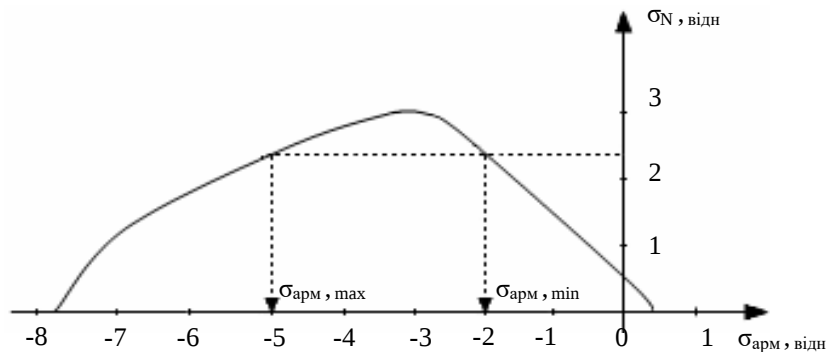


Рис. 4. Діаграма граничних циклів навантаження п'єзоелементів.

Використання відносних величин напружень робочого циклу $\sigma_{N, відн}$ і армуючих напружень $\sigma_{арм, відн}$ дає змогу за допомогою ряду коефіцієнтів врахувати в кожному конкретному випадку особливості міцності та конструкції активного елемента електроакустичного приладу.

Розроблена і наведена на прикладі кругового циліндричного приладу процедура переходу до розрахунків розмірів і натягів зміцнюючих елементів, що їм відповідають, які дозволяють створити в активному елементі армуючі напруження, необхідні для забезпечення потрібної механічної міцності конструкції електроакустичного приладу.

Електрична міцність конструкцій є одним із трьох внутрішніх факторів електроакустичних приладів, що обмежують їх енергетичні можливості. Результати її досліджень викладені в **розділі 4**. Встановлено, що причинами фізичного зменшення електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів є: руйнування вузлів ізоляції конструкції під дією часткових електричних розрядів; теплове старіння конструкційних електроізоляційних матеріалів; зниження міцності ізоляції конструкцій з причини зволоження активних елементів.

На надійність і довговічність електричної міцності конструкцій випромінюючих електроакустичних приладів, обумовлених дією збуджуючих їх електричних напруг, впливають: амплітуда, частота і тривалість прикладеної збуджуючої напруги; ступінь вологості матеріалів, з яких створено конструкцію; температура оточуючого середовища і ступінь власного розігріву елементів конструкції, які спроможні визвати зміни параметрів, механічне руйнування і теплову деструкцію електроізоляційних матеріалів. Визначено аналітичні співвідношення, пов'язані з наведеними складовими і характеристиками електроізоляційних матеріалів, взявши за основу залежності опору ізоляції R_{iz} від концентрації парів рідини C , відносної вологості φ , та температури T .

Зрозуміло, що при розробці конструкцій електроакустичних приладів їх електрична міцність визначається герметизацією конструкцій, тим більше для приладів, що працюють в рідинних середовищах, які звичайно є електропровідними. Крім того, електроакустичні прилади є механічними коливальними системами, застосування в конструкціях яких полімерних матеріалів забезпечує необхідну свободу здійснення заданих коливальних процесів. Але наявність таких матеріалів в конструкціях електроакустичних приладів завжди обумовлює появу дифузії молекул рідини робочого пружного середовища у внутрішні об'єми цих конструкцій.

Фізичними причинами проникнення молекул рідини до конструкцій герметизованих приладів є наступні: адсорбція молекул рідини на поверхні герметизуючої оболонки; дифузія молекули рідини крізь оболонку; сорбції молекул рідини матеріалом оболонки та елементами внутрішнього об'єму конструкції; сорбції молекул рідини конструкцією електроакустичного приладу.

Адсорбція молекул рідини характеризується протяжністю, яку визначає дифузія – швидкість адсорбції. Процеси дифузії математично формують у вигляді двох основних законів:

$$P = -D \frac{\partial C}{\partial x} \text{ та } \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2},$$

де P – коефіцієнт проникливості; D – коефіцієнт дифузії; C – концентрація речовини, що сорбується; x – просторова координата; t – час.

Перше рівняння характеризує дифузію через одиницю площі в одиницю часу при одиночному градієнті концентрації рідини. Друге рівняння визначає накопичення молекул рідини у визначеній точці як функцію часу.

Електричні величини п'єзокерамічних електроакустичних приладів, які в подальшому прийняті й пов'язані з електричною міцністю конструкцій, наступні: опір міжелектродної ізоляції r_0 ; тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta$; електрична ємність C_0 ; питомі поверхневі електричні опір ρ_s і провідність $g_s = 1/\rho_s$.

В цьому розділі наведено результати досліджень кількох типових варіантів виконання герметизації конструкцій електроакустичних приладів та їх впливу на електричні характеристики приладів, а, відтак, і їх електричну міцність.

Визначена вологостійкість п'єзокерамічних елементів в конструкціях електроакустичних п'єзокерамічних приладів. Розв'язок рівнянь дифузії і розрахунки величин r_0 (рис. 5) та ρ_s (рис. 6) залежно від відносної вологості φ свідчать про те, що порівняно з адсорбованою водою на чистій п'єзокераміці опір на границі «лак-п'єзокераміка» вище в діапазоні вологості 60-90 %.

Це свідчить про те, що при однаковій вологості питомий поверхневий опір п'єзокераміки збільшується в послідовності ТБК-3, ЦТБС-1, ЦТБС-3. Для опису залежності ρ_s лакованих п'єзокерамічних елементів від відносної вологості φ при $\varphi \geq 60\%$ встановлено співвідношення $\rho_s = B_1 e^{k_1 \varphi^2}$, де B_1 і k_1 – сталі коефіцієнти, що становлять для наведених вище складів п'єзокераміки відповідно $B_1 = 2,9 \cdot 10^{13}$ Ом; $2,4 \cdot 10^{14}$ Ом; $1,2 \cdot 10^{16}$ Ом та $k_1 = 7,7$; $5,75$; $7,33$. Отримані дані дозволяють визначити залежності C_0 та $\text{tg} \delta$ лакованих п'єзоелементів наведених складів від відносної вологості φ .

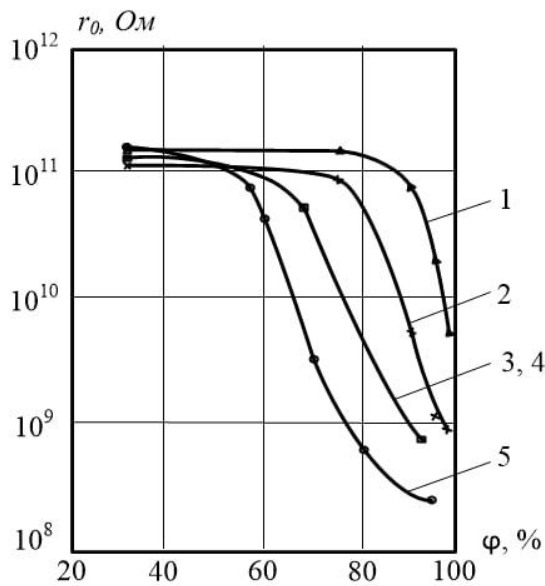


Рис. 5. Залежність опору міжелектродної ізоляції r_0 від відносної вологості φ для п'єзокерамічних елементів, лакованих лаками СБ-1С (криві 1, 3) та УР-231 (криві 2, 4) та без нанесеного покриття (крива 5).

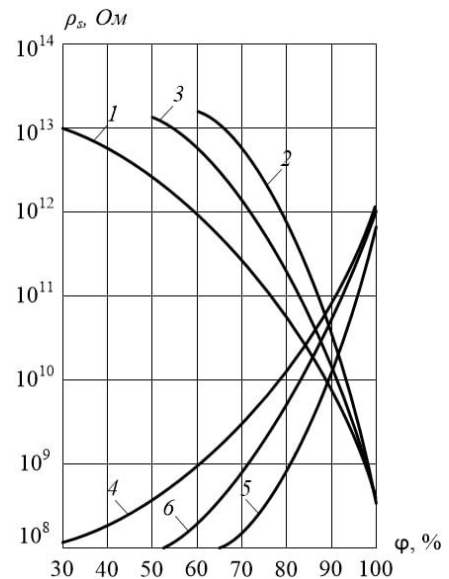


Рис. 6. Залежності питомого опору ρ_s (криві 1-3) та питомої поверхневої провідності g_s (криві 4-6) лакованих п'єзоелементів із складів ТБК-3 (криві 1, 4), ЦТБС-3 (криві 2, 5) і ЦТБСВ-1 (криві 3, 6) від відносної вологості φ .

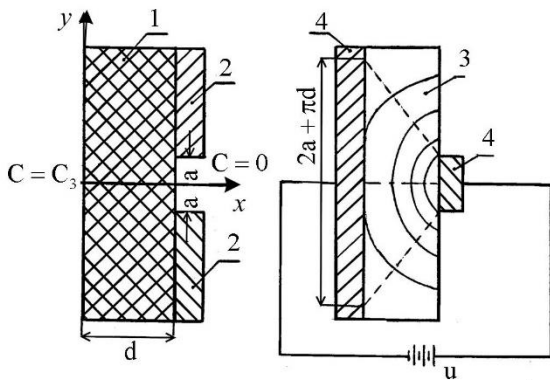
Встановлено, що особливе значення для активних елементів конструкцій електроакустичних приладів має не стільки зменшення адгезійної міцності лакового покриття, скільки зміни електричних характеристик зволоженого активного елемента. Для активних елементів важливим є не короткочасний ефект від нанесення лакового покриття, а його незмінність при тривалому перебуванні лакованого активного елемента при вологості $\varphi \geq 80\%$. Порівнюючи між собою відповідні криві на рис. 5 і 6 встановлено, що порівняно з адсорбованою водою на чистій п'єзокераміці опір води на границі лак – п'єзокераміка вище в діапазоні вологості 60-90%.

Розроблена методика розрахунків процесу дифузії рідини крізь елементи герметизації конструкцій електроакустичних приладів. Встановлено, що вологопроникливість M оболонки в стаціонарному режимі розраховують за формулами: для плоских оболонок $M = DS \frac{C_2 - C_1}{d} t$ і для циліндричних

$$M = 2\pi DH \frac{C_2 - C_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} t, \text{ де } S - \text{площа оболонки; } d - \text{товщина оболонки; } C_2, C_1 - \text{концентрації}$$

води в зовнішньому та внутрішньому поверхневих шарах оболонки відповідно; D – коефіцієнт дифузії; t – час, H – висота циліндричної оболонки, r_2, r_1 – зовнішній та внутрішній радіуси оболонки.

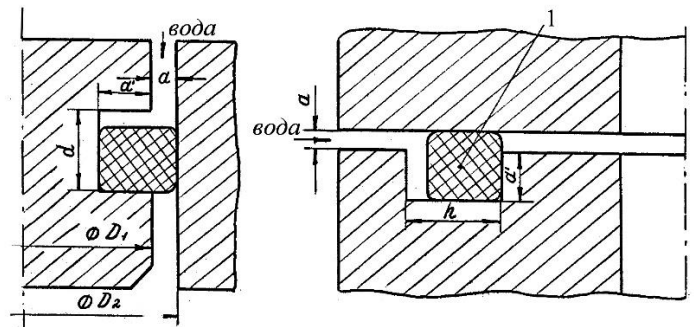
Аналітичні вирази і розрахунки виконані для кількох моделей: для зазору між двома металевими деталями, закритими полімерною оболонкою (рис. 7), і конструкцій ущільнень гумовим кільцем (рис. 8).



а

б

Рис. 7. Вузол герметизації (а) і його модель (б): 1 – полімер; 2 – металеві деталі; 3 – електропровідний папір; 4 – електроди.



а

б

Рис. 8. Циліндричне (а) і фланцеве (б) ущільнення: 1 – гумове кільце.

Для визначення дифузії рідини через полімерні матеріали складної конфігурації в зазорах (рис. 7, 8) запропонований електричний метод. Його сутність полягає в тому, що на електропровідний папір наносять конфігурацію вузла герметизації, відповідно граничним умовам наносять електроди і до них підводять електричний струм. В результаті визначають електричний струм через зазор, який дає змогу

встановити електричний опір цієї герметизації. Зокрема для вузлів герметизації, зображених на рис. 7 та 8, встановлено залежності $R = \frac{1}{g\pi} \ln\left(\frac{2a + \pi d}{2a}\right)$ та

$$M = 2\pi P \frac{1}{\ln\left[1 + \frac{\pi D_0^2}{2D(a + a')}\right]}, \text{ де } g - \text{питома провідність адсорбованої води.}$$

Встановлено, що розв'язання рівняння дифузії для процесів проникливості рідини через полімерні деталі є одним з необхідних елементів в створенні методики розрахунку часу ефективної роботи в частині електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів.

Розроблена методика розрахунку часу ефективної роботи конструкцій електроакустичного приладу при наявності в ній полімерних матеріалів. Встановлено, що час роботи залежить від вимог до характеристик електричної міцності цього приладу, дифузійного потоку через герметизуючу оболонку, вологоємності внутрішнього об'єму та вологостійкості активного елемента.

Одна з поширених конструкцій має у своєму складі циліндричний секціонований активний елемент висотою H . Його зовнішня поверхня герметизована гумовим чохлом товщиною d , а внутрішня порожнина з торців закрита металевими фланцями, причому $H \gg d$. Між гумовим чохлом і лакованим активним елементом знаходиться чохол із поліетилену товщиною 0,2 мм. Гумовий чохол має натяг 5...10 %. Розміри призм: висота $H = 71,6$ мм, ширина зовнішньої сторони – $l = 7,6$ мм. Кількість призм в кільці – 48 одиниць. Зміна електричних параметрів електроакустичного приладу буде тоді, коли молекули рідини, що дифундують через герметизуючу оболонку, пройдуть через лакове покриття і почнуть адсорбуватись на зовнішній поверхні п'єзокераміки.

Для визначення часу роботи конструкції, яку аналізують, необхідно розв'язати рівняння $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ (C – концентрація речовини, що сорбується, D – коефіцієнт дифузії), яке визначає накопичення молекул рідини у визначеній точці x як функцію часу t . Граничні умови при цьому мають вигляд: $C = 0$ для всіх x при $t = 0$; $C = C_s$ при $x = d$; $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ при $x = 0$. Оскільки $H \gg d$, то крайовими ефектами в такій конструкції можливо знехтувати. Встановлено, що час концентрації рідини в плівці лаку на поверхні п'єзокераміки, визначено виразом:

$$\tau = \frac{4d_{екв}^2}{\pi^2 D_{екв}} \ln \left[\frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_s} \right) \right],$$

де $d_{екв}$ – загальна товщина тришарової оболонки із гуми, поліетилену і лаку; $D_{екв}$ – еквівалентний коефіцієнт дифузії тришарової оболонки; φ – відносна вологість. При цьому встановлено, що повний електричний опір міжелектродної ізоляції має залежність:

$$R_0 = \frac{L\rho_s [C(t)] V_k \rho_v}{L\rho_s [C(t)] + V_k \rho_k},$$

де L , V_k – коефіцієнти, які залежать від конструкції активного елемента і визначають його поверхневий і об’ємний опір. Залежності опору R_0 міжелектродної ізоляції конструкції активного елемента від часу, розраховані згідно виразу, наведено на рис. 9, де криві 1, 2, 4, 5 наведені для описаної конструкції електроакустичного приладу, криві 3, 6 – для лакованого п’єзoelementу з чохлам із поліетилену. Криві 1–2 відповідають $D_{екв} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2/\text{с}$, а криві 4–5 для $D_{екв} = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2/\text{с}$.

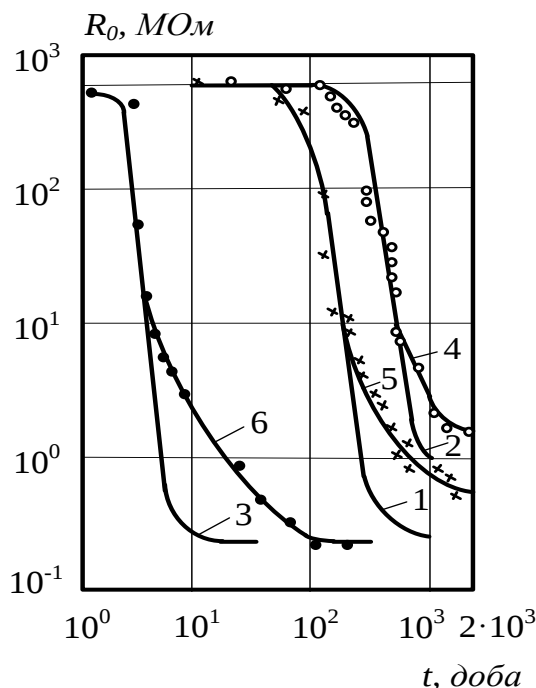


Рис. 9. Залежності опору міжелектродної ізоляції R_0 конструкції активного елемента електроакустичного приладу від часу t

Герметизацію конструкції електроакустичних приладів з газоподібним заповненням для роботи в пружних рідинних середовищах виконують переважно за допомогою металу, оскільки герметизуюча оболонка повинна витримувати великі гідростатичні тиски. При цьому, полімерні герметизуючі матеріали, наприклад, гуми, використовують на невеликій площі порівняно з загальною площею поверхні герметизуючої оболонки. Це, звичайно, місця забезпечення герметичності вводу кабелю і акустичні розв’язки активного елемента в конструкції електроакустичного приладу від конструкційних деталей. Виходячи з міркувань збереження статичної міцності герметизуючої оболонки полімерні деталі герметизують зазори між металевими деталями шириною не більше 2...3 мм і товщиною не менше 10 мм. Наслідком цього є велике значення часу затримки встановлення стаціонарного дифузного потоку рідини через герметизуючу оболонку. Для визначення часу ефективної роботи конструкції електроакустичного приладу використано перше рівняння дифузії у вигляді: $dM = P \frac{(p_2 - p_1)}{d} S dt$, де dM – елементарна маса проникаючої вологи через площу S ; P – коефіцієнт проникливості вологи; p_2 – тиск парів рідини

зовні герметизуючої оболонки; p_1 – тиск парів рідини у внутрішньому об'ємі конструкції приладу.

Рідина, яка проникла у внутрішній об'єм конструкції електроакустичного приладу, частково буде знаходитися в об'ємі, зайнятому газом, а частково сорбується внутрішніми полімерними деталями. Тоді: $dM = \sum \left(V_i h_i + \frac{V_o \mu}{RT} \right) dp$, де V_i , h_i – об'єм і коефіцієнт вологорозчинності в i -тій полімерній деталі; V_o – об'єм, заповнений газом; μ , R , T – відповідно молекулярна вага, стала Больцмана та абсолютна температура пару.

Запропоновано полімерні герметизуючі деталі розкласти на пластини і циліндричні чохли різної конфігурації. Для однієї пластини і одного циліндричного чохла вологу, що проникає в конструкцію електроакустичного приладу

запропоновано визначити: $dM = \left(\frac{P_n S_n}{d_n} + 2\pi P_y \frac{H}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right) (p_2 - p) dt$, де P_n , P_y – коефіцієнти

вологопроникливості пластини і циліндричного чохла відповідно. Для газонаповнених конструкцій електроакустичних приладів останнє рівняння при початковій φ_0 та поточній φ відносним вологостям у внутрішньому об'ємі конструкції приладу має вигляд

$$\tau_c = \frac{\sum V_i h_i + \frac{V_o \mu}{RT}}{\frac{P_n S_n}{d_n} + 2\pi P_y \frac{H}{\ln \frac{r_2}{r_1}}} \ln \frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi}.$$

Згідно з цим виразом для ряду типових конструкцій (рис. 10) моделей герметизації виконано розрахунки ефективного часу τ_c дії герметизації. Зокрема час ефективної дії герметизації при початковій вологонасиченості внутрішніх деталей $\varphi_0 = 30 - 50\%$ становить $\tau_c = 2,5 \cdot 10^5 \ln \frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi}$.

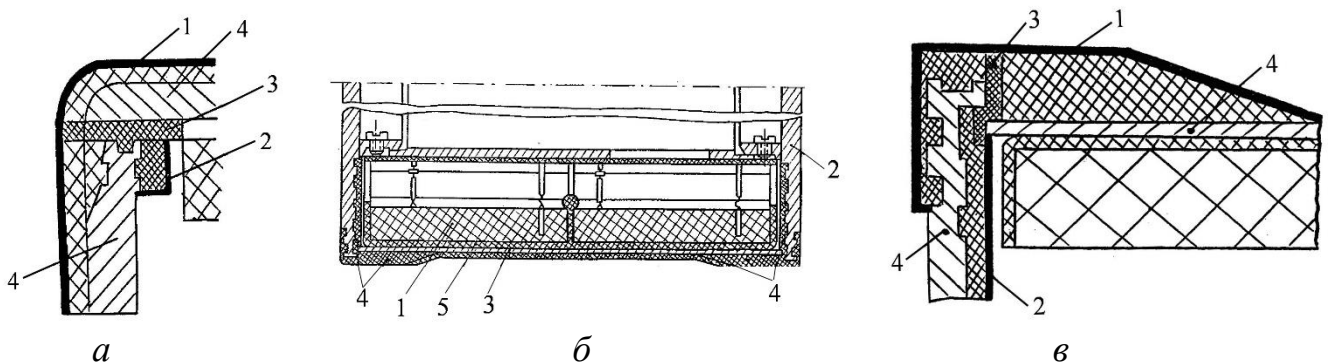


Рис. 10. Моделі вузлів герметизації: зі складною конфігурацією полімерів (а); газонаповненого приладу (б); складної конфігурації (в): (а) – 1, 2 – електроди, 3 – герметизуюча оболонка, 4 – ізолятори; (б) – 1 – активний елемент, 2 – фланець, 3 – бандаж, 4 – акустична ізоляція, 5 – внутрішній гумовий чохол; (в) – 1, 2 – електроди, 3 – герметизуюча оболонка, 4 – ізолятори.

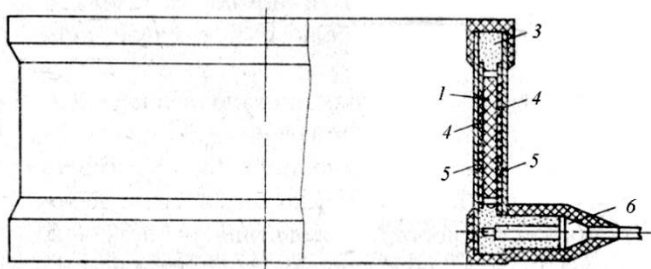


Рис. 11. Конструкція циліндричного приладу

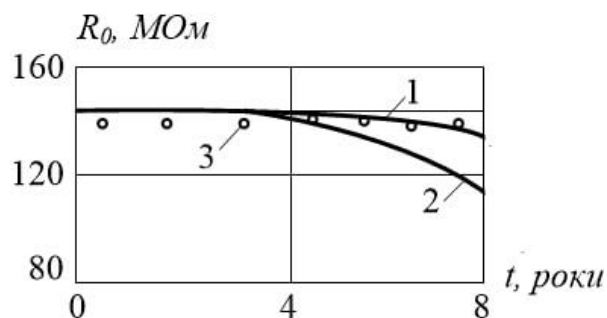


Рис. 12. Розраховані залежності опору міжелектродної ізоляції. 1, 2 – залежності від початкової відносної вологості у внутрішньому об'ємі 30% та 50% відповідно, 3 – експериментальні значення.

Розроблено та апробовано методи розрахунків концентрації парів рідини в конструкціях електроакустичних приладів різних типів: силових, розвантажених та компенсованих. Встановлено, що основою всіх цих розрахунків є знання кількісних значень характеристик вологості конструкційних матеріалів – коефіцієнтів дифузії, проникливості та поглинання.

Щодо механізму дії парів рідини на електричну міцність конструкцій електроакустичних приладів, вони поділені на три групи:

- конструкції з адгезією полімерів до активного п'єзокерамічного елемента;
- конструкції з полімерами без адгезії до активного елемента;
- конструкції з наявністю в їх складі вбудованих осушувачів (рис. 13)..

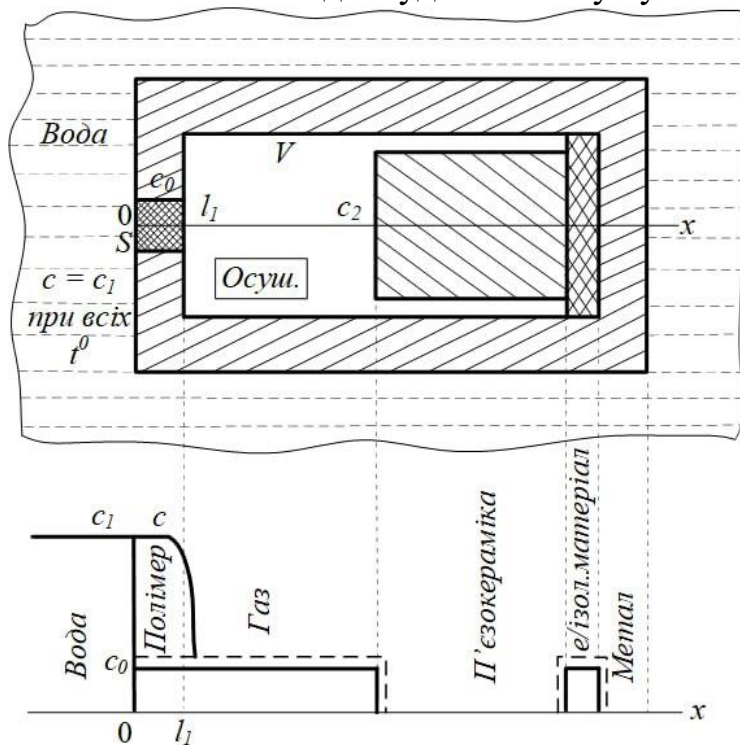


Рис. 13. Схема будови приладів з наявністю в їх складі спеціально вбудованих осушувачів; граничні і початкові умови задачі.

На рисунку наведено граничні і початкові умови та розподіл концентрації парів рідини в приладі з осушуючим пристроєм, які мають вигляд: концентрація пару в рідині $C = C_1$ при $x \leq 0$ для всіх t ; концентрація пару в полімері $C = C_0$ при $0 < x < l$ і $t = 0$; концентрація пару в газі $C = C_2 = \text{const}$ при $x = l$ і $t = t_n$, де t_n – час насичення поглинача.

В результаті розв'язання рівняння дифузії визначено наступне співвідношення для концентрації парів в полімерній оболонці і на його основі повну кількість Q поглиненого пару:

$$Q = DS \frac{C_2 - C_1}{l} t - \frac{2lS}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_2 \cos n\pi - l_1}{n^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{l^2}\right) \right] - \frac{4C_0 l S}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{D(2m+1)^2 \pi^2 t}{l^2}\right] \right\}.$$

Саме величина Q визначає електричний стан конструкції електроакустичного приладу. Насичення поглинача може бути досягнуто за час $t = \frac{Q_c l}{DS(C_1 - C_2)}$, де $Q_c = \Phi \cdot M$ – кількість рідини, яку може поглинути осушуючий пристрій, Φ – поглинаюча властивість одиниці маси осушувача, M – маса речовини осушувача.

Визначено вирази для знаходження загального часу вологозахисту конструкції електроакустичного приладу.

В розділі 5 викладено результати досліджень методів розрахунків теплової міцності конструкцій електроакустичних приладів. Особливістю роботи п'єзокерамічних приладів є нагрівання їх конструкцій внаслідок виділення тепла в активних елементах, виготовлених з п'єзокераміки. Причиною розігріву є механічні та електричні втрати в матеріалах активних елементів. Внутрішній розігрів приладів призводить до ряду негативних наслідків, зокрема деполяризації п'єзокераміки, зміни їх електроакустичних характеристик, механічних руйнувань.

Останнім часом в техніці складається тенденція до зростання потужностей та функціональних можливостей приладів з одночасним зменшенням їх маси та габаритів, тому забезпечення нормального теплового режиму роботи конструкцій електроакустичних приладів набуває особливої актуальності.

Запропоновано методику аналізу теплових полів перетворювачів, яка полягає в:

- аналітичному розрахунку теплових полів шляхом розв'язання диференціального рівняння теплопровідності Фур'є для спрощеної моделі приладу та розрахунку об'ємної потужності джерел тепловиділення;
- комп'ютерному моделюванні теплового режиму роботи приладів з визначенням найбільш небезпечних ділянок в їх конструкції методом скінчених елементів.

Проаналізовано теплові поля ряду конструкцій електроакустичних приладів – стержневих та циліндричних. Для типових конструкцій цих перетворювачів встановлено залежності температурного розподілу в стаціонарному режимі,

визначено час розігріву до максимальної температури та встановлені найбільш проблемні ділянки таких конструкцій.

Розроблено рекомендації щодо особливостей комп'ютерного моделювання теплових режимів роботи конструкцій електроакустичних приладів в програмі SolidWorks, зокрема їх стаціонарний режим, перехідний режим, застосовані матеріали та теплові напруження, які виникають в конструкціях.

За запропонованою методикою проведено дослідження теплових режимів роботи для деяких конструкцій циліндричних та стержневих конструкцій приладів.

На етапі аналітичного розрахунку для знаходження теплового поля електроакустичного приладу застосовано диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є в наступному вигляді:

$$\lambda_T \nabla^2 T + q_v = C_T \rho \frac{dT}{dt},$$

де ∇^2 – оператор Лапласа, q_v – об'ємна потужність джерел тепловиділення, C_T – питома теплоємність тіла, ρ – густина тіла, t – час, λ_T – коефіцієнт теплопровідності тіла.

Досліджено кілька конструкцій електроакустичних приладів. Аналітичним методом визначено теплові поля для конструкцій приладів у вигляді кругових циліндричних перетворювачів компенсованого та силового типів. Для циліндричного компенсованого перетворювача, конструкція та спрощена розрахункова модель якого наведені на рис. 14, процедура визначення теплового поля полягає в наступному.

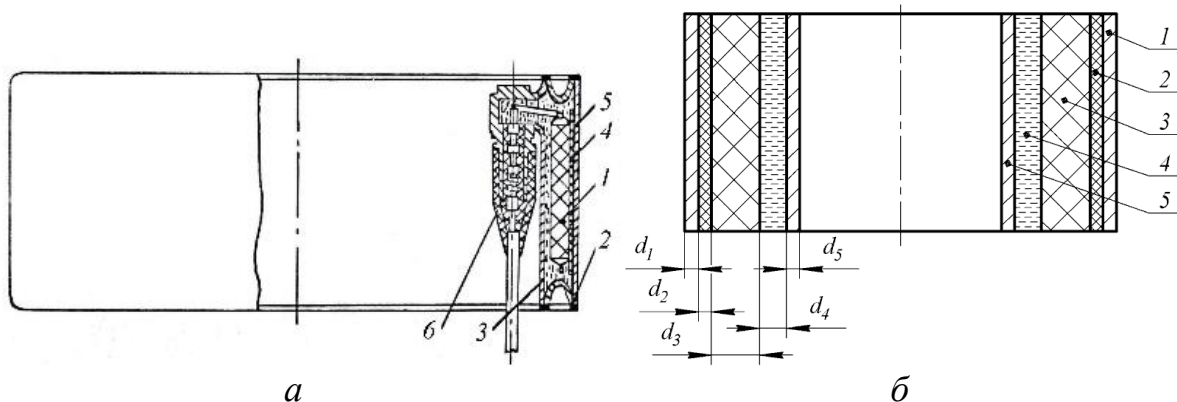


Рис. 14. Конструкція (а) та спрощена фізична модель (б) циліндричного компенсованого рідиннозаповненого перетворювача

Для розрахунку теплового поля несиметричної конструкції герметизованого циліндричного перетворювача з рідинним заповненням необхідно розв'язати 5 рівнянь теплопровідності для кожного з шарів, оскільки в конструкції електроізоляційні шари не однакові, мають різну товщину і коефіцієнт теплопровідності.

Для розв'язання задачі теплопровідності у багатошарових конструкціях модель циліндричного перетворювача буде представлена у вигляді системи окремих шарів

Модель стратифікована для розрахунку теплового поля такого перетворювача у вигляді системи з п'яти нескінченних шарів різної товщини, кожен з яких

характеризується своїми коефіцієнтами теплопровідності (рис. 15). Шари 1, 2 – зовнішні герметизуючі шари складаються з титану та полімерного матеріалу, товщиною d_1 і d_2 ; 3 – активний елемент з п'єзокераміки, товщина d_3 ; 4 – шар електроізоляційної рідини товщиною d_4 ; 5 – внутрішній герметизуючий шар з титану, товщина d_5 . Коефіцієнти тепловіддачі зовнішньої та внутрішньої поверхонь перетворювача відповідно α_{T1} та α_{T5} . Джерелом виділення тепла є активний елемент, виготовлений з п'єзокераміки. Тепловиділення характеризують величиною об'ємної потужності джерел q_{V3} .

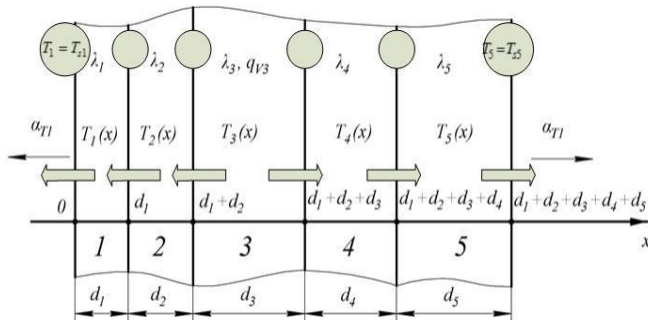


Рис.15. Стратифікована модель циліндричного перетворювача, що аналізують

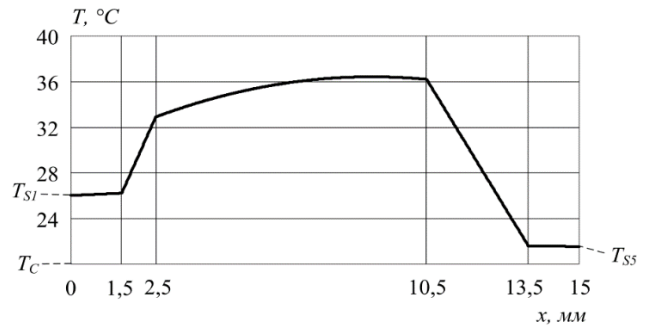


Рис.16. Теплове поле циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції

Рівняння теплопровідності розв'язано для кожного шару. Наприклад, для шару 1 маємо: $0 < x \leq d_1$; $T_1(x) = C_1x + C_2$. Подібним чином формулюємо умови і для інших 2 ... 5 шарів. Для знаходження невідомих констант $C_1..C_{10}$, необхідно використати граничні умови. Вони полягають у наступному.

1. Рівність температури в точках контакту шарів. Наприклад, для шару 1 $T_1(x)|_{x=d_1} = T_2(x)|_{x=d_1}$, $T_1(x)|_{x=0} = T_{S1}$. І подібним чином для інших 2...5 шарів.
2. Рівність теплового потоку на границях шарів з оточуючим середовищем.

Наприклад, для шару 1 $\lambda_{T1} \frac{dT_1(x)}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha_{T1}(T_{S1} - T_c)$. І подібним чином для шару 5.

3. Рівність теплового потоку на границях шарів. Наприклад, для шару 1 $\lambda_{T1} \frac{dT_1(x)}{dx} \Big|_{x=d_1} = \lambda_{T2} \frac{dT_2(x)}{dx} \Big|_{x=d_1}$. І подібним чином для шарів 2...5 шарів.

Підставивши вирази для рівняння кожного з шарів у граничні умови, та зробивши ряд перетворень, отримаємо вирази для констант $C_1..C_{10}$ та невідомих температур T_{S1} і T_{S5} .

У результаті підстановки чисельних виразів, графік теплового поля у циліндричному перетворювачі, матиме наступний вигляд, зображений на рис.16.

Для електроакустичного приладу у вигляді стержневого перетворювача (рис. 17) розв'язано одновимірну задачу, де враховано розподіл температури по довжині конструкції:

- для пасивного шару 1 – випромінюючої накладки:

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} = 0, \quad T_1(x) = C_1 x + C_2,$$

- для тепловіділяючого шару 2 – активного елементу:

$$\frac{d^2 T_2}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda_2} = 0, \quad T_2(x) = -\frac{q_v}{2\lambda_2} (x - d_1)^2 + C_3 (x - d_1) + C_4,$$

- для пасивного шару 3 – тильної накладки:

$$\frac{d^2 T_3}{dx^2} = 0, \quad T_3(x) = C_5 (x - (d_1 + d_2)) + C_6.$$

Невідомі константи $C_1..C_6$ знаходять з граничних умов.

В результаті на рис. 18 наведено розрахований графік розподілу температури, де по осі абсцис – довжина шарів в метрах, по осі ординат – температура в Кельвінах.

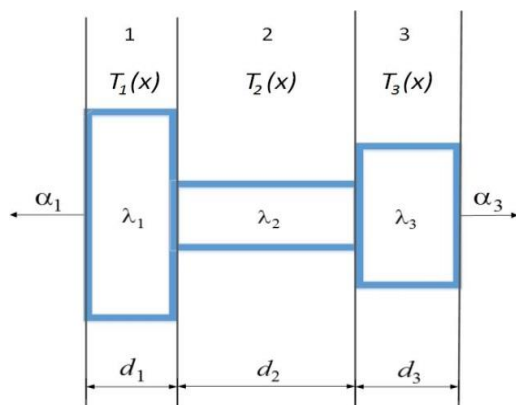


Рис. 17. Спрощена модель електроакустичного приладу стержневої конструкції

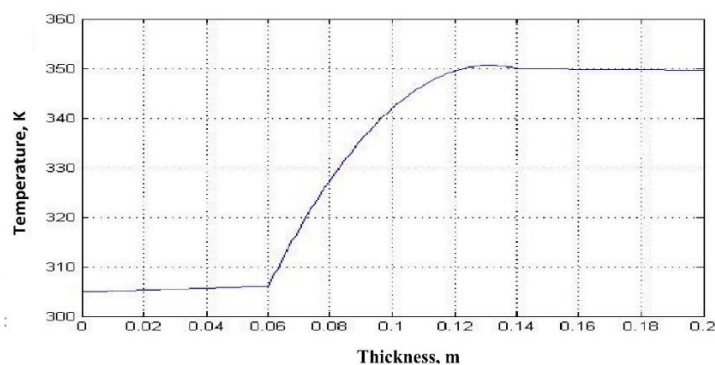


Рис. 18. Розподіл температури в конструкції приладу

Комп'ютерне моделювання надає можливість врахувати реальну геометричну форму електроакустичного приладу, а також змодельовати перехідний режим та визначити час, за який його конструкція остаточно нагріється.

Проведено огляд існуючих програмних продуктів, в яких є можливість аналізу теплового поля конструкцій електроакустичних приладів.

В ANSYS можливе проведення як стаціонарних, так і нестаціонарних теплових розрахунків. Є можливість розрахунку лінійних і нелінійних характеристик матеріалів, теплопровідності як всередині елементу, так і між поверхнями, конвекції, випромінювання. В COMSOL також можливо моделювати фізичні системи та певні явища і процеси за допомогою додаткових модулів. З модулем «Теплопередача» (Heat Transfer Module) є можливість досліджувати вплив нагріву чи охолодження на різні прилади, деталі або в контексті процесів. Програмне забезпечення SolidWorks має можливість відносно легкої побудови двовимірної та тривимірної моделі та імпорту даних в інші програми. Додатковий модуль Simulation дає можливість моделювати теплові поля (thermal), частоту механічного резонансу коливальної системи і

параметричні оптимізації. Остання програма оптимальна для вирішення поставленого завдання аналізу теплових полів електроакустичних приладів.

Для аналізу в системі закладений алгоритм методу скінченних елементів.

За допомогою комп'ютерного моделювання визначено і наведено теплові поля ряду конструкцій електроакустичних приладів у вигляді: циліндричного заповненого рідиною перетворювача, такого ж перетворювача з герметизацією торців, стержневого перетворювача (рис. 19).

Завдяки комп'ютерному моделюванню досліджено процес розігріву конструкцій. На рис. 20 наведено перехідний режим розігріву стержневої конструкції приладу. При цьому залежність температури від часу досліджено в трьох точках приладу – на випромінюючій накладці (червона лінія), в точці максимального розігріву на активному елементі (синя лінія) і на тильній накладці (зелена лінія).

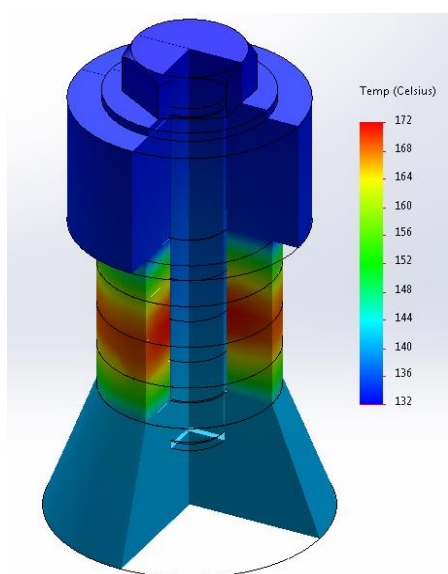


Рис. 19. Теплове поле стержневої конструкції електроакустичного приладу

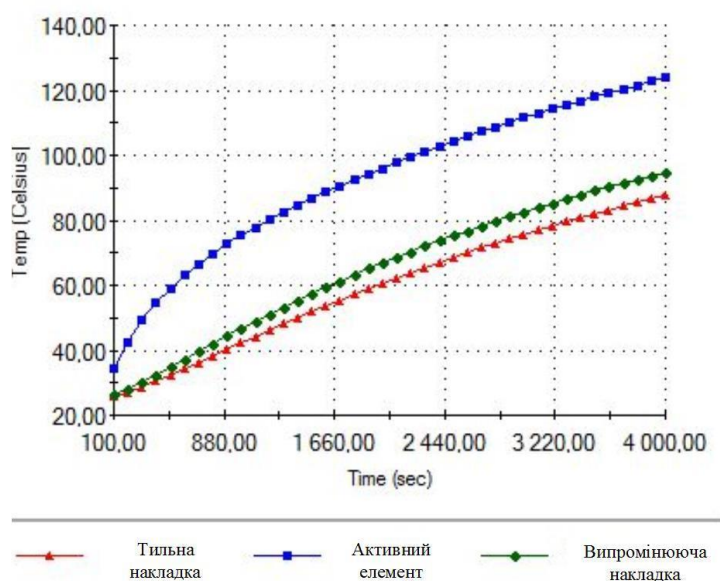


Рис. 20. Розігрів конструкції електроакустичного приладу в перехідному режимі

Встановлено, що процес розігріву конструкції є інформативним, коли змінити конструкцію для покращення теплового режиму не має змоги. В такому випадку рекомендовано проаналізувати час, за який конструкція розігріється до допустимої температури.

Для підтвердження результатів аналітичного розрахунку проведено експериментальні дослідження працюючого електроакустичного приладу стержневої конструкції за допомогою трьох приладів з термопарою (рис. 21).

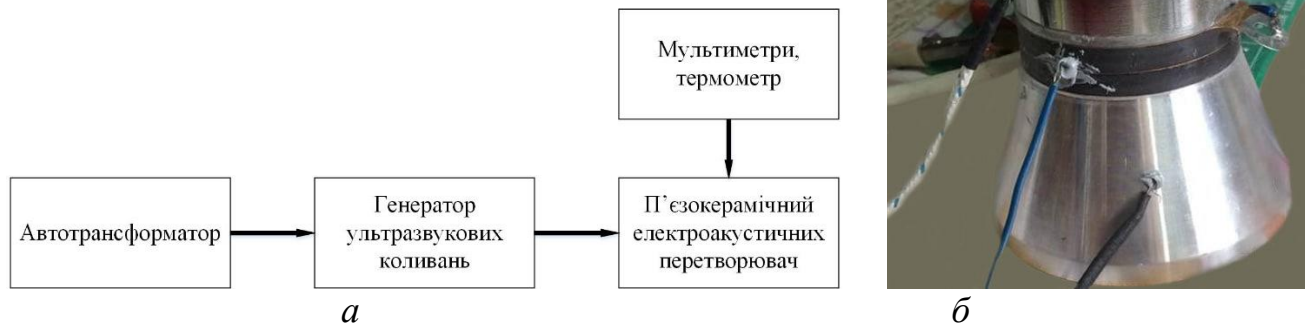


Рис. 21. Схема (а) і зразок приладу (б) для експериментальних досліджень розігріву електроакустичного приладу стержневого типу

Усереднені за 7 незалежними реалізаціям вимірювань при початковій температурі 30°C за 60 с роботи приладів графіки залежності температури наведено на рис. 22:

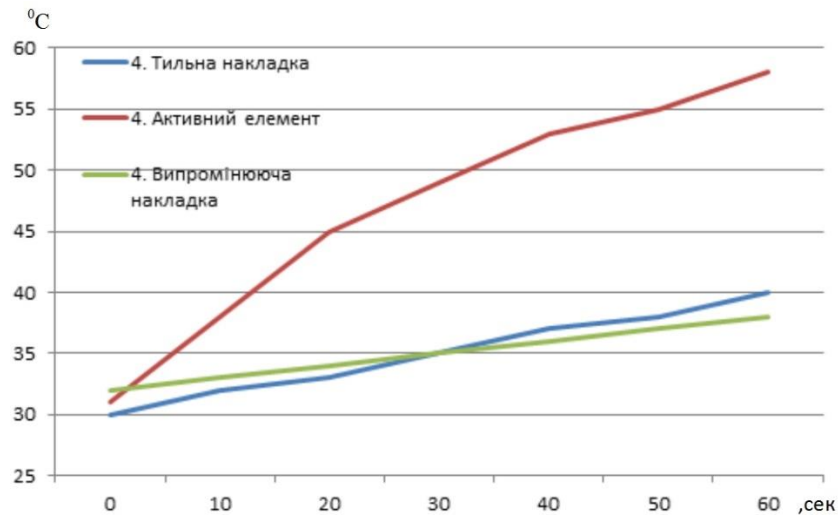


Рис. 22. Експериментально виміряні температури приладу

Порівняння цих експериментальних даних з теоретичними (рис. 20) показує, що різниця між експериментальними даними та даними моделювання становить відповідно 2,2%, 13,3%, 7% для тильної накладки, активного елемента та передньої накладки. Це підтверджує адекватність прийнятих розрахункових моделей.

Також проведено аналітичний розрахунок та комп'ютерне моделювання теплового режиму роботи циліндричного перетворювача на прикладі циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції (рис. 23)

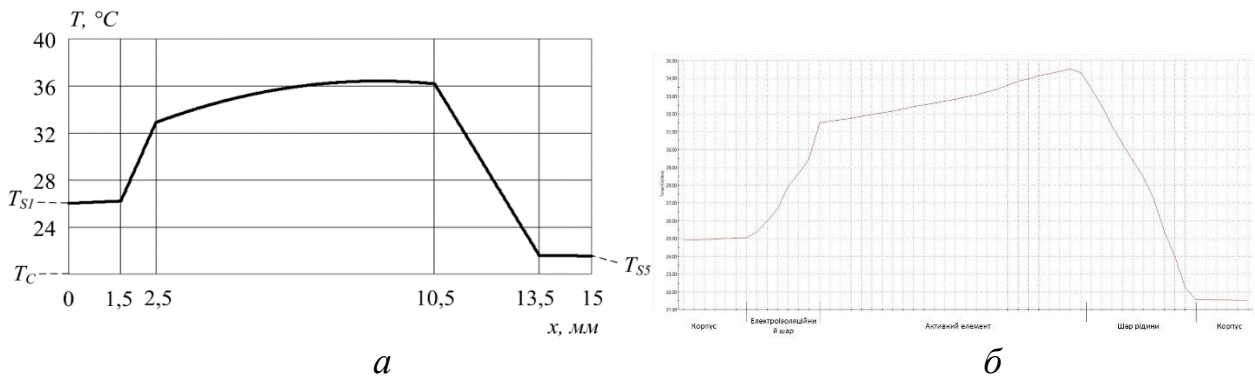


Рис. 23. Теплове поле циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції (*а* – результати аналітичного розрахунку, *б* – результати комп'ютерного моделювання)

Комп'ютерне моделювання надає змогу виявити відмінність температурного розподілу ближче до торців, яка обумовлена тепловідведенням торців перетворювача (рис. 24). Отримати такий розподіл температур аналітичним методом неможливо. Така конструкція максимально відповідає реальній конструкції циліндричного перетворювача.

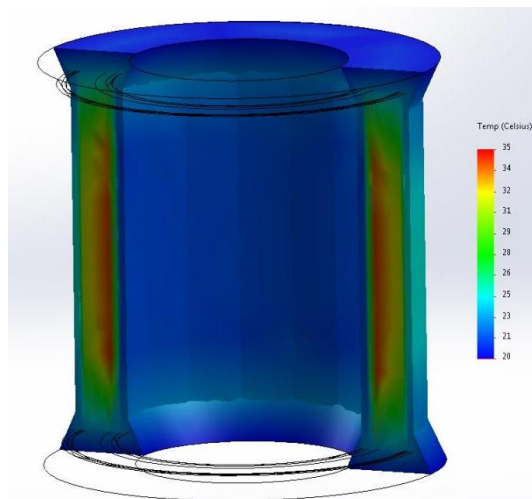


Рис. 24. Теплове поле перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції з герметизацією торців

Проаналізовано практику конструювання електроакустичних приладів в частині збільшення їх теплової міцності: підбір конструкційних матеріалів; зменшення тепловиділення; застосування схем тепловідводу; введення додаткових елементів конструкцій. Проаналізовано пасивні і активні методи охолодження і можливості їх практичної реалізації в цих конструкціях. Серед них: використання різних типів радіаторів; зміна форми випромінюючої або тильної (рис. 25) накладок стержневих конструкцій приладів, що підвищує ефективність охолодження на 15-25%; введення теплорозсіюючих шарів металевих вставок; введення між накладками і п'єзокерамікою деполяризованих п'єзокерамічних елементів; заповнення корпусів конструкцій газом, рідиною, або заливним матеріалом, термопастою. Це дозволяє

збільшити теплопровідність конструкції. Зокрема, теплопровідність неону становить 0,0493 Вт/(м·К), а повітря – 0,026 Вт/(м·К).

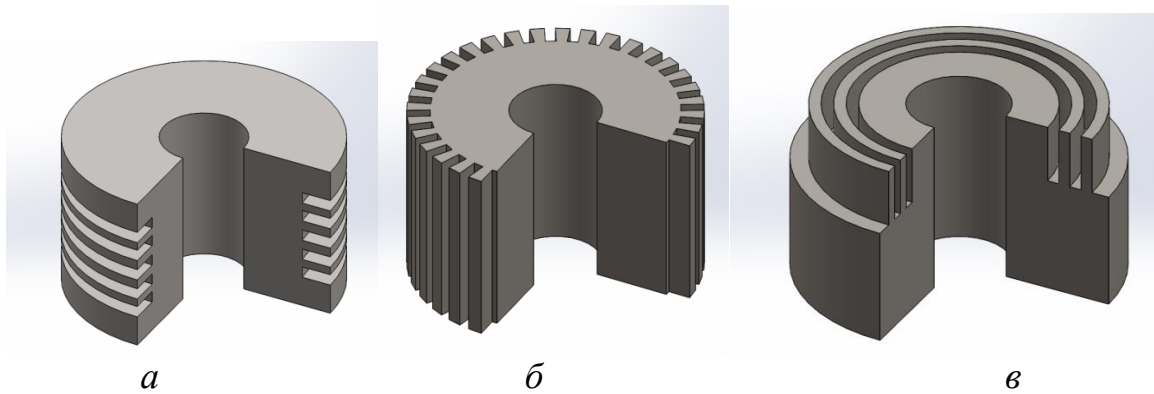


Рис. 25. Тильна накладка: *а* – з горизонтальними ребрами; *б* – з вертикальними ребрами; *в* – з циліндричними ребрами

В результаті дослідження запропоновано діаграму ефективності пасивних методів охолодження конструкцій електроакустичних приладів (рис. 26). Це дозволило зменшити температуру їх розігріву в 1,5 – 2 рази і збільшити час.

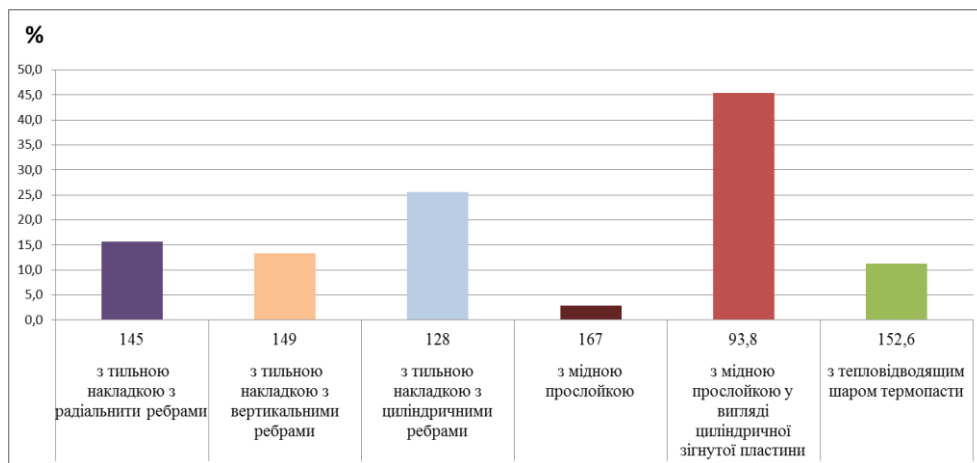


Рис. 26. Діаграма ефективності пасивних методів охолодження

Проаналізовано доцільність застосування в конструкціях електроакустичних приладів активних методів охолодження. Визначено формули для розрахунків ефективності охолодження газами і рідинами та встановлені їх позитивні та негативні наслідки.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему розробки теоретичних основ розрахунку та фізико-технічних засад конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ з урахуванням наслідків взаємодії в їх конструкціях фізичних полів при перетворенні і формуванні енергії, взаємодії з пружними середовищами які обумовлюють перехід перетворювачів зі стану одномодових в стан багатомодових та впровадження цих наслідків в практику акустики пружних середовищ. В процесі виконання дисертаційної роботи автором особисто отримані наступні наукові результати:

1. Вперше при розробці електромеханічних приладів акустики пружних середовищ запропоновано аналізувати їх як частину складної механічної коливальної системи, до якої входять елементи конструкції електромеханічного приладу акустики та оточуючі пружні середовища. Досліджено вплив розміщення елементів конструкції приладу в просторі, форми елементів, характеристик середовищ на взаємодію фізичних полів і процесів, що виникають в цій системі при перетворенні і просторовому формуванні енергії. Ці взаємодії призводять до появи в даній коливальній системі нових додаткових резонансних режимів, втрати одномодовості і набуття багатомодовості конструкціями електромеханічних приладів акустики. Як наслідок - суттєво збільшуються їх електричні, механічні та акустичні навантаження, які є визначальними при розробці конструкцій багатомодових приладів.

2. Вперше доведено, що характер електричного збудження значно впливає на характеристики електричних, механічних і акустичних полів в конструкціях багатомодових приладів акустики пружних середовищ. Дослідженням частотно-незалежних, частотно-залежних і змішаних видів електричного збудження встановлено, що навантаження конструкцій багатомодових приладів значно зростають порівняно з одномодовими. Поява додаткових низькочастотних резонансів розширює діапазон механічних навантажень в 2-4 рази, а амплітуд їх зміщень або коливальних швидкостей – в 3-8 разів в залежності від частоти додаткових резонансів. Тому врахування характеру електричного збудження має бути визначальним елементом процесу конструювання багатомодових електромеханічних приладів акустики пружних середовищ.

3. Вперше встановлено, що у випадку збудження багатомодових приладів частотно-незалежними електричними сигналами, основним параметром, який визначає їх конструктивну міцність є механічна складова. Показано, що при такому збудженні багатомодових конструкцій в області низьких частот з'являються додаткові резонанси, які мають в 3-6 разів (в залежності від частоти додаткового резонансу) більші механічні навантаження у вигляді зміщення або коливальної швидкості, порівняно з одномодовими приладами. У зв'язку з цим удосконалено методи кількісної оцінки їх статичної та динамічної механічних міцностей та створено розрахункове забезпечення конструювання. При цьому вперше вибір характеристик конструкційних матеріалів і розмірів деталей конструкцій здійснено з урахуванням кількісних значень конкретних діючих навантажень, схем побудови конструкцій та технологій їх виготовлення, міри випромінюваної питомої

потужності, питомого хвильового опору п'єзокераміки, навантаженості приладу та його форми коливальних, тривалості прикладення напружень, кількості їх знакозмінних циклів та наявності в п'єзокераміці різних концентраторів напружень та дефектів. Для збільшення динамічної міцності конструкцій армуванням визначено діаграму граничних циклів навантаження п'єзоелементів та отримано аналітичні розрахункові співвідношення. Встановлено, що збільшення відносних армуючих напружень більш ніж в 2 рази дозволяє більш, ніж в 2 рази збільшити амплітуди робочих напружень.

4. Вперше встановлено, що при електричному збудженні багатомодових приладів частотно-залежними сигналами конструктивна міцність приладів визначається їх електричною міцністю. Зазначено, що характеристики міцності конструкцій приладів визначаються опором електричних втрат в елементах електроізоляції і герметизації, їх електричною ємністю і тангенсом кута діелектричних втрат. Встановлено, що останні величини залежать від: рівня концентрації парів рідини в конструкціях електроакустичних приладів; відносної вологості; питомого електричного опору, температури і робочої частоти, застосованих керамічних та полімерних електроізоляційних матеріалів. Запропоновано розрахункове забезпечення конструювання електроакустичних приладів в частині електричної міцності шляхом розв'язку рівнянь дифузії. Отримано аналітичні вирази для розрахунків вологостійкості активних елементів в конструкціях багатомодових приладів. Встановлено, що для конструкцій зі складами п'єзокераміки ЦТС (PZT) при відносній вологості $\varphi = 60 - 90 \%$ питомий електричний поверхневий опір становить $r_0 = 10^{11} - 10^9$ Ом відповідно. Нанесення на поверхню елементів лаків на основі епоксидних смол або поліуретану при тих же значеннях відносної вологості збільшує поверхневий опір до $r_0 = 10^{13} - 10^{11}$ Ом.

5. З урахуванням наслідків взаємодії в конструкціях багатомодових приладів фізичних полів різної природи в частині аналізу теплових навантажень вперше запропоновано і розвинуто два методи – аналітичний і комп'ютерного моделювання. Для ряду конструкцій електроакустичних приладів у вигляді циліндричних і стержневих перетворювачів визначені розподіли температурних полів по об'єму їх конструкцій. Визначено технічні шляхи зменшення теплових навантажень конструкцій багатомодових приладів шляхом застосування: радіаторів різного виду; тепловідвідних вставок; інертних газів, електроізоляційних рідин або термопаст, які заповнюють внутрішній простір конструкцій. Встановлено, що застосування пасивних шляхів дозволяє збільшити теплопровідність конструкцій приладів в 2-5 разів, зокрема при використанні неону порівняно з повітрям з $0,026 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ до $0,0493 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Це дозволяє зменшити температуру в 1,5 – 2 рази та збільшити час розігріву конструкцій.

6. Експериментальні дослідження, проведені в роботі, підтверджують відповідність теоретичних результатів, отриманих аналітичними методами, реальним особливостям конструкцій багатомодових приладів акустики.

7. Результати, отримані в роботі, дозволили створити фізико-технічні засади конструювання багатомодових приладів. Вони надають можливість обирати характер електричного збудження, виходячи з вимог забезпечення всіх видів міцності конструкції, та існуючих можливостей реалізації збудження; містять методи і

методики кількісного визначення електричної, механічної та теплової міцностей розроблюваних конструкцій, а також дозволяють порівнювати варіанти конструкцій багатомодових приладів акустики і за потреби змінювати їх складові ще на етапі конструювання.

8. Результати дисертації впроваджено в навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського та проєктні роботи ДП «Київський науково-дослідний інститут гідропримієн», що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дрозденко О.І., Дрозденко К.С., Лейко О.Г. Конструювання п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів. Урахування експлуатаційних навантажень: Монографія. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 157 с. ISBN: 978-613-5-82752-1.

Особистий внесок здобувача: розділи 2 та 4 монографії.

2. N.V. Bogdanova, A.G. Leiko, S.A. Naida, A.I. Drozdenko / Cylindrical Piezoceramic Radiator as a Complex Dynamic System, J. Nano- Electron. Phys. 11 No 6, 06011-1 – 06011-7 (2019). (Scopus Q3, Категорія «А») DOI: 10.21272/jnep.11(6).06011

Особистий внесок здобувача: проведення розрахунків параметрів акустичних полів випромінювачів та аналіз їх впливу на конструкції електроакустичних приладів.

3. V. Didkovskyi, S. Naida, O. Drozdenko, K. Drozdenko Experimental researching of biological objects noninvasive passive acoustothermometry features. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, v. 1, n. 5 (103), p. 6-12, feb. 2020. (Scopus Q3, Категорія «А»). DOI: 10.15587/1729-4061.2020.192594

Особистий внесок здобувача: розробка конструкції електроакустичного перетворювача, розрахунки, моделювання.

4. O. Leiko, N. Bogdanova, O. Bogdanov, O. Drozdenko, K. Drozdenko. Possibilities of Controlling the Dynamic Properties of a Cylindrical Piezoceramic Acousto-electronic Device with Two-frequency Resonance, J. Nano- Electron. Phys, 12 No 6, 06003 (2020) (Scopus Q3, Категорія «А»). DOI: 10.21272/jnep.12(6).06003.

Особистий внесок здобувача: проведення розрахунків параметрів акустичних полів циліндричних випромінювачів та аналіз їх впливу на конструкції електроакустичних приладів.

5. Naida S.A., Onykienko Y.O., Drozdenko O.I., Smolenska O.I., Baran V.S., Iakunina N.O. Analysis of the influence of load inductance on nonlinear distortions of a class D amplifier caused by «dead time». Electrical Engineering & Electromechanics, 2021, no. 3, pp. 32-37. (Scopus Q3, WoS, Категорія «А»). DOI:10.20998/2074-272X.2021.3.05

Особистий внесок здобувача: розробка систем живлення конструкцій приладів, аналітичні розрахунки.

6. Drozdenko K., Naida S., Drozdenko O., Damarad A., Pareniuk D., Vakulenko L., Adaricheva Z. (2022) The Influence of a Low-Frequency Musical Fragment on the

Neural Oscillations, Archives of Acoustics, 47 (2): 169-179, doi: 10.24425/aoa.2022.141647 (Scopus Q3, WoS). DOI: 10.24425/aoa.2022.141647.

Особистий внесок здобувача: розробка вимірювальної системи та алгоритмів експериментального дослідження.

7. Дрозденко Е.С. Пространственное распределение внутренней температуры биологического объекта при решении задач акустотермометрии / Е.С. Дрозденко, А.И. Дрозденко // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – 2014, Вип. 7 (123). – С. 24-27. (Категорія «Б»). ISSN 1681-7710.

Особистий внесок здобувача: постановка та розв'язок задачі визначення теплових полів об'єктів аналітичними методами.

8. Дрозденко О.І. Метод розрахунку температур розігріву конструкцій циліндричних електроакустичних перетворювачів компенсованого типу, герметизованих метало-полімерними шарами / О.І. Дрозденко // Electronics and Communications. – 2014, Vol. 19, №3(80) – Р. 88-93. (Категорія «Б»). DOI:10.20535/2312-1807.2014.19.3.141478.

9. Владимирский А.А. Модернизированный термоакустический течеискатель А-10Т2 / А.А. Владимирский, И.А. Владимирский, А.И. Дрозденко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України. – 2014, вип. 70. – С. 93-97. (Категорія «Б»). ISSN 2309-7655.

Особистий внесок здобувача: розрахунок теплових полів та розробка елементів конструкції термоакустичного течешукача.

10. Лейко О.Г. Перетворювачі для рідинних акустичних технологій і конструкторські шляхи нейтралізації гідростатичного тиску, що діє на них / О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – 2015. – Вип. 1 (126). – С. 37-40. (Категорія «Б»). ISSN 1681-7710.

Особистий внесок здобувача: аналіз зовнішніх експлуатаційних впливів на елементи конструкції та розробка заходів для зміцнення циліндричних електроакустичних приладів.

11. Дрозденко О.І. Теплові поля силових конструкцій циліндричних п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів / О.І. Дрозденко // Electronics and Communications. – 2015, Vol. 20, №1(83) – Р. 65-72. (Категорія «Б»). DOI:10.20535/2312-1807.2015.20.1.47709

12. Дрозденко А.И. Излучение максимальной акустической мощности системами гидроакустических цилиндрических пьезокерамических преобразователей с окружной поляризацией / А.И. Дрозденко, А.Г. Лейко // Microsystems, Electronics and Acoustics, 2018, vol. 23, no. 2 – Р. 58 - 65. (Категорія «Б»). DOI: 10.20535/2523-4455.2018.23.2.121316.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, знаходження розв'язку в загальному вигляді.

13. Дрозденко О.І. Сучасні підходи до конструювання гідроакустичних антен корабельних гідроакустичних станцій / А.В. Дерепя, В.В. Джаназян, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко // Озброєння та військова техніка. – 2019, №2(22). – С. 93-98. (Категорія «Б»). DOI:10.34169/2414-0651.2019.2(22).93-98.

Особистий внесок здобувача: аналіз зовнішніх експлуатаційних впливів на елементи конструкції та розробка заходів для зміцнення електромеханічних приладів.

14. Дрозденко О.І. Механічна міцність гідроакустичних циліндричних випромінювачів з внутрішніми екранами / А.В. Дереп, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко, А.О. Святненко // Озброєння та військова техніка. – 2019, №3(23). – С. 110-116. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2019.3(23).110-116.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, аналіз впливу екрану на механічну міцність елементів конструкції електромеханічних приладів.

15. Дереп А.В. Властивості електричних полів гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами / А.В. Дереп, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко, А.О. Святненко // Озброєння та військова техніка. – 2019, №4(24). – С. 41-49. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2019.4(24).41-48.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, аналіз впливу екрану на електричну міцність електромеханічних приладів.

16. Дрозденко О.І. Забезпечення теплового режиму роботи стержневих конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів / О.І. Дрозденко, К.С. Дрозденко, О.Г. Лейко, Л.В. Перчевська // Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2019, №24(5). – С. 56-63. (Категорія «Б»). DOI: 10.20535/2523-4455.2019.24.5.190452.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної та математичної моделі, аналітичні розрахунки.

17. Дереп А.В. Властивості гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами в залежності від характеристик екранів. / А.В. Дереп, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко, А.О. Святненко // Озброєння та військова техніка. – 2020, №.1 (25) – С. 89-95. (Категорія «Б»). DOI: 1034169/2414-0651.2020.1(25).89-95.

Особистий внесок здобувача: розробка фізичної моделі, аналітичні розрахунки.

18. Дрозденко О.І. Про вплив конструкційних елементів гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами на акустичні властивості гідроакустичних станцій / О.І. Дрозденко, А.В. Дереп, О.Г. Лейко, А.О. Святненко // Озброєння та військова техніка. – 2020, №.2 (26). – С. 112-118. (Категорія «Б»). DOI: 1034169/2414-0651.2020.2(26).112-118.

Особистий внесок здобувача: розробка фізичної моделі, розрахунок конструкційних елементів випромінювачів.

19. Дереп А.В. Про вплив фізичних характеристик заповнюючих рідин на електричні властивості гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами. / А.В. Дереп, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко, К.А. Шишкова, В.В. Каніщев // Озброєння та військова техніка. – 2020, №3(27). –С. 77-84. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2020.3(27).77-84.

Особистий внесок здобувача: розробка фізичної моделі, розрахунок конструкційних елементів випромінювачів.

20. Дрозденко О.І. Випромінювання звуку циліндричним гідроакустичним перетворювачем в присутності екрану з електрично керованими акустичними властивостями. / О.І. Дрозденко, А.В. Дереп, О.Г. Лейко, О.В. Богданов, О.І. Нижник

// Озброєння та військова техніка. – 2020, №4(28). – С. 83-88. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2020.4(28). 83-88.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, аналіз впливу екрану на електричну міцність електромеханічних приладів, розрахунки.

21. Позднякова О.М. Випромінювання звуку циліндричним п'єзокерамічним гідроакустичним перетворювачем з динамічно керованими параметрами / О.М. Позднякова, О.І. Дрозденко, А.В. Дерепка, І.О. Ластівка, О.Г. Лейко, Осадча А.К. // Озброєння та військова техніка. – 2021, №1(29). – С. 64-70. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2021.1(29).64-70.

Особистий внесок здобувача: розрахунки, аналіз впливу екрану на електричну міцність електромеханічних приладів.

22. Perchevska, L., Drozdenko, O., Drozdenko, K., Leiko, O. (2021). Study of the influence of the housing on the cooling efficiency of the piezoceramic electroacoustic langevin-type transducer. Technology Audit and Production Reserves, 3 (1 (59)), 50–55. (Категорія «Б»). DOI:10.15587/2706-5448.2021.231279

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної та математичної моделі, аналітичні розрахунки.

23. L. Perchevska, O. Drozdenko, and K. Drozdenko, “Shifting the operating frequency of the piezoceramic electroacoustic transducer langevin type using passive cooling methods” ScienceRise, no. 4, pp. 3–10, Aug. 2021, DOI: 10.21303/2313-8416.2021.002019.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної та математичної моделі, аналітичні розрахунки

24. Патент України на винахід № UA 121721 C2, Україна, МПК G 01 S 7/52. Глибоководний звуковідбиваючий екран / Дерепка А.В., Лейко О.Г., Аверічев І.В., Кочарян О.О., Позднякова О.М., Коцюба В.С., Олійник К.А., Джаназян В.В., Дрозденко О.І., № a201900433; заявл. 16.01.2019, опубл. 10.07.2020. Бюл. № 13/2020 р.

Особистий внесок здобувача: проведення патентних досліджень, розробка опису винаходу.

25. Патент України на винахід № UA 124067 C2, Україна, МПК G 01 S 7/52. Гідроакустичний випромінюючий тракт / Дерепка А.В., Лейко О.Г., Кочарян О.О., Майборода О.О., Блінцов О.В., Дрозденко О.І., Богданова Н.В., Ісаєнко О.С., а 201900432; заявл. 16.01.2019, опубл. 14.07.2021. Бюл. № 28.

Особистий внесок здобувача: проведення патентних досліджень, моделювання, розробка опису винаходу.

26. Пат. на кор. модель 129345 Україна, МПК G 01 S 7/52. Акустична планарна антенна решітка з малими боковими полями / Дерепка А.В., Лейко О.Г., Блінцов О.В., Аверічев І. В., Кочарян О.О., Позднякова О.М., Бережний О.М., Дрозденко О.І., Святненко А.О., Комаров В.О., Куровська Т.Ю. – № u201805064; заявл. 08.05.2018, опубл. 25.10.2018. Бюл. № 20, 2018р.

Особистий внесок здобувача: проведення патентних досліджень, розробка опису корисної моделі.

27. O. Drozdenko, K. Drozdenko, and L. Perchevska, "Features of thermal fields calculation for cylindrical piezoceramic transducers with compensated design", 2018 IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW), Conference Proceedings, pp. 44–47, 2–6 October, 2018, Kyiv, Ukraine.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, знаходження розв'язку в загальному вигляді.

28. O. Drozdenko, K. Drozdenko, L. Perchevska, "Methods for analyzing the thermal field of rod type piezoceramic electroacoustic transducers", 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Conference Proceedings, pp. 750–753, 16–18 April, 2019, Kyiv, Ukraine. (Scopus).

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної та математичної моделі, аналітичні розрахунки.

29. O. Leiko, O. Drozdenko, A. Derepa and A. Sviatnenko, "Acoustic Remote Sensing Piezoceramic Transducers with Internal Screen," 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 710-713, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088849. (Scopus).

Особистий внесок здобувача: розробка фізичної та математичної моделей електроакустичних приладів.

30. O. Drozdenko, K. Drozdenko, O. Leiko and L. Perchevska, "The Thermal Fields Analysis of Sealed Cylindrical Piezoceramic Electroacoustic Transducers Compensated Construction," 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 815-819, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088757 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: постановка та розв'язок задачі визначення теплових полів електроакустичних приладів аналітичними методами, моделювання.

31. Дрозденко А.И. Методы устранения температурных напряжений в конструкциях электроакустических преобразователей. / А.И. Дрозденко, А.М. Попова // Zbiór raportów naukowych. "Inżynieria i technologia. Teoria. Praktyka". Wykonane na materiałach Międzynarodowej NaukowoPraktycznej Konferencji 29.11.2014 - 30.11.2014 roku. Szczecin. – Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour». – 2014. – str.61-62.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розрахунки, аналіз результатів.

32. Дрозденко А.И., Дрозденко Е.С., Быкова Л.В. Объемная мощность источников тепловыделения в конструкциях электроакустических преобразователей // Inżynieria i technologia. Współczesne problemy i perspektywy rozwoju (29.04.2016 - 30.04.2016): Zbiór raportów naukowych. - Krakow, 2016. - p. 50-52.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної моделі, аналіз результатів.

33. Дрозденко А.И., Перчевская Л.В. Определение теплового поля пьезокерамических электроакустических преобразователей стержневого типа // Пятая Международная научно-техническая конференция «Информационные проблемы теории акустических, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем IPST-2016». (29.11 – 01.12.2016.) Харьков 2016.

Особистий внесок здобувача: постановка та розв'язок задачі визначення теплових полів приладів аналітичними методами, аналіз результатів.

34. Дрозденко А.И., Перчевская Л.В. Определение тепловых полей цилиндрических пьезокерамических преобразователей // *Inżynieria i technologia. Badania podstawowe i stosowane: wyzwania i wyniki* (30.05.2017 - 31.05.2017 roku): Zbiór raportów naukowych. - Gdańsk, 2017. – С. 67-69.

Особистий внесок здобувача: постановка та розв'язок задачі визначення теплових полів циліндричних приладів, аналіз результатів.

35. Дрозденко О.І., Кулик Т.А. Вибір матеріалів для конструкції ультразвукового накінечника факоемульсифікатора // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення" (випуск 21) (12.07.2017) – Тернопіль, 2017.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів.

36. Дрозденко О.І., Перчевська Л.В. Візуалізація теплових полів електроакустичних перетворювачів з використанням комп'ютерних технологій моделювання // "Мультимедійні технології в освіті та інших сферах діяльності" (16-17.11.2017) – Київ, НАУ 2017.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, моделювання, аналіз результатів.

37. Дрозденко О.І., Галайба М.В. Ультразвуковий генератор з системою автоматичного регулювання частоти // *Science, research, development. Technics and technology.* – Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Warszawa, 2018. - р. 43-45. ISBN: 978-83-66030-04-6.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка алгоритмів роботи систем живлення електроакустичних приладів.

АНОТАЦІЯ

Дрозденко О.І. Теоретичні основи розрахунків та фізико-технічні засади конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.08 «Прикладна акустика та звукотехніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми створення теоретичних основ розрахунків і фізико-технічних засад конструювання електромеханічних приладів акустики (ЕМПА) пружних середовищ, побудованих на основі багатомодових коливальних систем в частині їх механічної, електричної і теплової міцності з урахуванням появи нових знань щодо взаємодії фізичних полів і процесів при перетворенні та формуванні енергії та умов застосування цих приладів в пружних середовищах.

В дисертаційній роботі проведено аналіз нових знань в технічній акустиці, в частині зв'язку фізичних полів різної природи при перетворенні енергії в п'єзокерамічних середовищах, взаємодії акустичних полів при їх формуванні в оточуючих пружних середовищах і взаємного зв'язку процесів перетворення і формування енергії та їх впливу на процес конструювання ЕМПА на основі багатомодових коливальних систем. Проаналізовано експлуатаційні навантаження електромеханічних приладів акустики з урахуванням наслідків дії пружних середовищ та взаємодії полів і процесів, що призводить до появи багатомодовості ЕМПА та розроблено фізико-технічні заходи щодо їх врахування в процесі конструювання. Розроблені теоретичні основи та методи розрахунків механічної, електричної та теплової міцності конструкцій випромінюючих п'єзокерамічних приладів різних типів на основі багатомодових коливальних систем.

Ключові слова: конструкція, міцність, навантаження електричні, навантаження механічні, навантаження теплові, перетворювач п'єзокерамічний електроакустичний, прилад електромеханічний

ANNOTATION

Drozdnenko O.I. Theoretical Foundations for Calculations and Physical-Technical Principles of Designing Electromechanical Devices for Acoustics of Elastic Media. – Qualification Scientific Work in Manuscript Form.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.09.08 "Applied Acoustics and Audio Engineering". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is dedicated to solving an important scientific and technical problem of developing theoretical foundations for the calculation and physical-technical principles of designing electromechanical acoustic devices for elastic media. These devices are based on multimode oscillatory systems concerning their mechanical, electrical, and thermal strength, considering new knowledge about the interaction of physical fields and processes during energy conversion and formation, as well as the conditions for their application in elastic media.

The first chapter analyzes the physical problems that limit the level of acoustic power radiation by electroacoustic devices in various elastic media. Acoustic power radiation is associated with the interaction of three physical fields—mechanical, electrical, and acoustic—and the specific features of the liquid medium (cavitation) in which these devices operate. The interaction of these fields also leads to the emergence of a thermal field in the structures of electromechanical devices.

In piezoceramic devices, energy conversion is characterized by the interconnection of electrical, mechanical, and acoustic fields. The formation of fields in elastic media is influenced by the interaction of emitted and scattered fields from device elements, which is

determined by multiple reflections of sound waves. Additionally, the interaction between energy conversion and formation processes plays a crucial role. Recent advances in determining acoustic fields of electroacoustic devices have made it possible to consider acoustic interactions between fields. This new knowledge has significantly altered engineers' understanding of oscillatory processes in piezoceramic acoustic devices, the limits of maximum acoustic power radiation depending on the type of elastic medium, and the associated structural strength issues.

A problem related to sound radiation by an arbitrary system of emitters consisting of a finite number of circular piezoceramic cylindrical radiators with circumferential polarization was examined. Analysis of the results indicates that in advanced piezoceramic acoustic devices, the mechanical and electrical strength of structures should be several times higher compared to cases where existing physical fields and their interactions are not considered.

Chapter 2 analyzes modern physical and technical problems related to the design and technological implementation of electroacoustic devices, taking into account advanced requirements for their parameters and operating conditions. The main operational loads for elastic liquid media are identified, and approaches to their resolution for underwater electroacoustic devices of various purposes are substantiated.

The analysis allows for the development of new approaches to the comprehensive solution of design and technological implementation of underwater electroacoustic devices. New methods for designing promising electroacoustic devices of various purposes are proposed, differing in operating frequency ranges, working conditions, and a wide range of hydroacoustic technologies and manufacturing processes.

Strict design requirements for underwater electroacoustic devices arise due to their prolonged operation under high external pressure, exposure to aggressive environments, and the impact of significant electrical voltages. This necessitates continuous research and practical implementation of different physical principles of device construction, improvement of design methodologies, the use of new structural materials, and constant refinement of device configurations.

Chapter 3 is dedicated to ensuring the mechanical strength of electromechanical acoustic device structures. These devices experience both static and dynamic loads during operation. To maintain structural integrity, the working loads from all influencing factors must not exceed critical values, with a sufficient safety margin.

Design solutions for reducing static mechanical stresses include increasing prism thickness and inserting materials with lower modulus of elasticity than piezoceramics. These measures increase static mechanical strength by approximately 1.5 times. The dynamic mechanical stresses arising during sound radiation depend on the emission mode, structural design, reinforcement nodes, oscillation characteristics, vibrational system parameters, and device assembly technology. The higher the specific acoustic power emitted by the electroacoustic device, the greater the dynamic stresses in its active element.

One of the most effective ways to ensure the long-term cyclic strength of active elements in radiating electroacoustic devices is the creation of preliminary compressive stresses (reinforcement stresses). The selection of these stresses depends on the amplitude of working cycle stresses and considers factors such as strength distribution parameters,

stress concentration coefficients, and specific features of active elements. The relationship between working cycle stress amplitude and reinforcement stress values is presented as a limiting load cycle diagram for piezoelements. It is established that reinforcement increases the dynamic mechanical strength of piezoceramic acoustic devices by at least 1.8 to 2.2 times, depending on the device type.

In the fourth section of this research, the electrical strength of electromechanical acoustic device structures is investigated. It has been established that the physical reduction of electrical strength in electroacoustic devices is caused by insulation breakdown due to partial discharges, thermal aging of insulation materials, and moisture absorption by active elements. The reliability and durability of the electrical strength of radiating electroacoustic devices are influenced by factors such as the amplitude, frequency, and duration of applied excitation voltage, material humidity, ambient temperature, and self-heating of structural elements.

In the fifth section, methods for thermal strength analysis of electromechanical acoustic devices are explored. The heating of piezoceramic devices due to internal heat generation is examined. A method for thermal field analysis is proposed, combining Fourier heat conduction equation solutions and finite element modeling. Thermal fields of rod and cylindrical electroacoustic devices are analyzed, determining stationary temperature distributions, heating times, and critical zones. Experimental validation was performed on a working rod-type electroacoustic device.

Existing design practices for improving thermal strength are reviewed, including passive and active cooling techniques such as radiators, shape modifications, heat-dissipating layers, depolarized piezoceramic elements, and filling structures with gas, liquid, or thermal paste. These measures improve thermal conductivity, reducing heating by 1.5–2 times and extending operational duration.

The dissertation presents new insights into technical acoustics by analyzing interactions between physical fields during energy conversion in piezoceramic environments and acoustic field formation in elastic media. The study establishes theoretical foundations and calculation methods for mechanical, electrical, and thermal strength in radiating piezoceramic devices based on multimodal oscillatory systems.

Keywords: construction, electrical loads, electromechanical device, mechanical loads, piezoceramic electroacoustic transducer, strength, thermal loads.