

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук,  
професора **Сокол Галини Іванівни**  
на дисертаційну роботу  
**ПЕРЧЕВСЬКОЇ ЛЮДМИЛИ ВАДИМІВНИ**

### **«ТЕПЛОВІ ПОЛЯ КОНСТРУКЦІЙ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В РЕЖИМІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗВУКУ**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
з галузі знань **17 Електроніка та телекомунікації**  
за спеціальністю **171 Електроніка**

#### **1. Проблема, що вирішується у дисертації, та актуальність теми.**

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми виникнення теплових полів у конструкціях п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів (ПЕП), які працюють в режимі випромінювання звуку. Авторка досягла поставленої мети за допомогою трьох методів дослідження. Робота є цілісною та завершеною.

У час розвинутого техногенного ХХІ сторіччя гостро стоїть проблема зниження теплових втрат та їх випромінювань у довкілля. Настав час глибоко вивчити як виникають теплові поля в конструкціях ПЕП, розробити методики розрахунків теплових характеристик, запропонувати нові методи зниження теплових випромінювань і втрат.

П'єзокерамічні електроакустичні перетворювачі (ПЕП) активно використовуються у гідроакустиці протягом десятиріч у другій половині ХХ та на початку ХХІ сторіч. Тому з точки зору часу ця галузь техніки досить молода. Враховуючи велику потребу у ПЕП у морському флоті, слід констатувати, що проектуванню і конструюванню п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів особливо в режимі випромінювання звуку надавалася велика увага.

Відомі роботи з досліджень перетворювачів вчених: О. Г. Лейка, В. Г. Савіна, О. І. Дрозденка, В. Н. Хмелева, Е. В. Ільченко, М. В. Богуша, В. В. Богородського, Л. А. Зубарева, Е. А. Корепіна, В. І. Якушева, Умеди М. (Umeda, M), Накамура К. (Nakamura, K.), Такахаші С. (Takahashi, S.), Учино К. (Uchino, K), Матісон А. (Mathieson, A), Ли Х. (Lee H.).

Але перелік невирішених проблем ще й досить залишається досить великим. Одна з них – це визначення теплових навантажень. Тому необхідність подальшого вирішення задач з теплових навантажень у корпусах ПЕП визначила актуальність обраної теми дисертації Перчевської Людмили Вадимівни. Це сумнівів не викликає.

У зв'язку з цим при виконанні досліджень у дисертаційній роботі поставлені *мета і задачі*.

## **2. Мета і задачі.**

*Метою* роботи є дослідження теплових полів конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, які виникають в них в режимі випромінювання звуку та розробка конструктивних заходів, спрямованих на зменшення температури нагріву.

Мета є актуальною, оскільки призначена для вирішення важливої проблеми сьогодення – боротьби з тепловими втратами у конструкціях ПЕП, що є важливим з економічної точки зору. Автор досягла поставленої мети за допомогою трьох методів дослідження.

Для досягнення поставленої мети розв'язані *наступні задачі*.

1. Проаналізувати конструкції п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів з точки зору безпеки нагріву та виділити такі конструкції, для яких нагрів є найбільш небезпечним.

2. Розробити методики для аналізу теплових полів типових конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, які дозволяють знаходити кількісні характеристики теплових полів для цих перетворювачів.

3. Відпрацювати методику знаходження та аналізу теплових полів для конструкцій електроакустичних перетворювачів з урахуванням їх конструкційних особливостей та умов експлуатації.

4. На основі аналізу теплових полів розробити заходи для захисту перетворювачів від перегріву та виробити рекомендації щодо застосування цих заходів при конструюванні перетворювачів.

5. Дослідити вплив додаткових елементів конструкції, призначених для забезпечення нормального теплового режиму ПЕП на його резонансні характеристики.

*Об'єктом* дослідження є теплові процеси в конструкціях п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку.

*Предметом* дослідження є теплові поля конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку.

### ***В дисертації отримано такі наукові результати:***

- вперше застосовано аналітичний метод розрахунку для знаходження теплових полів п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів стержневого типу;

- вперше здійснено порівняння аналітичного методу розрахунку та комп'ютерного моделювання для знаходження теплових полів типових конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів стержневого та циліндричного типів;

- вперше досліджено теплові поля стержневих п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів з урахуванням додаткових елементів конструкції, зокрема корпусу;

- вперше досліджено ефективність використання активного та пасивного охолодження для перетворювача;
- вперше досліджено зміщення резонансної частоти стержневого перетворювача при застосуванні пасивних методів охолодження;
- отримали подальший розвиток конструктивні заходи для забезпечення нормального теплового режиму стержневих перетворювачів: застосування охолоджуючих вставок, охолоджуючих шарів зі спеціальних сумішей, спеціальних форм накладок перетворювачів;
- отримали подальший розвиток методики дослідження теплових полів, що використовуються при створенні конструкцій сучасних п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів.

### **3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, практичне значення отриманих у дисертаційній роботі результатів.**

Виконання дисертаційної роботи пов'язано з науковими тематиками та планами кафедри Акустичних та мультимедійних електронних систем Національного Технічного Університету України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського. Отже, *практичне значення* отриманих у дисертаційній роботі результатів підтверджується їх використанням при виконанні НДР кафедри. Тема дисертації пов'язана з науковим напрямком кафедри, а також з науково-технічними програмами та держбюджетними конкурсними темами Міністерства освіти та науки України і відповідає спеціальності 171 Електроніка за напрямом 17 Електроніка та телекомунікації.

Автором

- розроблено методики розрахунку теплових полів для випромінюючих п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів стержневого та циліндричного типів.
- розроблені рекомендації щодо застосування конструктивних заходів для зменшення температури розігріву перетворювачів стержневого типу: застосування охолоджуючих вставок, охолоджуючих шарів зі спеціальних сумішей, спеціальних форм накладок перетворювачів, активного охолодження.
- отримані залежності, за якими можливо врахувати вплив додаткових елементів конструкції, призначених для охолодження перетворювачів, на резонансні характеристики перетворювачів.

Дані методики та рекомендації будуть корисні при конструюванні стержневих та циліндричних перетворювачів. Наведені рекомендації щодо зменшення максимальної температури розігріву стержневого перетворювача корисні для конструювання перетворювачів, в яких теплові навантаження виходять за границі допустимих норм.

Результати роботи впроваджені в освітній процес кафедри Акустичних та мультимедійних електронних систем Національного Технічного Університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у дисциплінах «Основи конструювання в електроніці» та «Конструювання акустичних приладів та систем».

Отже, *практичне значення* результатів, що отримала автор, підтверджується використанням в інженерній практиці та навчальному процесі. Впровадження результатів дисертації підтверджується Актом, що наведений у Додатках.

#### **4. Методи дослідження.**

Дослідження, що викладені в роботі ґрунтуються на аналітичному розв'язанні задач математичної фізики, а саме: теплове поле перетворювачів досліджене трьома методами. Аналітичний розрахунок проводиться методом розв'язання диференціального рівняння теплопровідності. Моделювання теплових полів проводилось методом скінчених елементів в програмному середовищі SolidWorks. Проведені також експериментальні дослідження теплових полів стержневого перетворювача, параметри і характеристики вимірювались точково за допомогою термопар, під'єднаних до цифрових термометрів. На основі експериментальних досліджень резонансні частоти перетворювачів розраховувались за трансцендентним рівнянням графічним методом та моделюванням методом скінчених елементів в SolidWorks.

**5. Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 91 найменувань та 4 додатків. Робота містить 43 рисунки. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 129 сторінок.

#### **6. Основний зміст дисертації.**

Зміст дисертаційного дослідження викладений у чотирьох розділах, у яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У *вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, описано методи дослідження нагріву перетворювачів, надана інформація про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

В *першому розділі* проведено літературний огляд найбільш вразливих до теплового впливу типів п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, їх застосування. Описані проблеми, що притаманні галузям, де використовують п'єзокерамічні електроакустичні перетворювачів, які нагріваються. Проаналізовані механізми теплових процесів в перетворювачах. Розглянуті роботи про методи визначення температури розігріву перетворювачів та їх теплові поля. *Слід зазначити*, що здобувач провела більш поширений огляд проблем, що виникають при проектуванні та конструюванні п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, ніж розглядання окремих теплових процесів. *А саме* розглянуті роботи інших вчених як з вирішення проблем з теплових навантажень, так і з механічних, вібраційних, електричних навантажень. Важливим у роботі автора є те, що проаналізовані *причини виникнення нагріву п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів та енергетичні втрати*. Запропонований поділ негативних наслідків нагріву перетворювачів на три групи: обмеження у використанні, що накладають на прилад через збільшення нагріву; зміна параметрів приладу і вибір матеріалів з належними характеристиками; незворотні наслідки нагріву. Слід відзначити, що обсяг

обзору літератури в дисертації є достатнім для того, щоб авторка змогла провести визначення відомих методів розрахунків теплових процесів при конструюванні п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів та запропонувати складання нових.

В *другому розділі* описана методика аналітичного розрахунку теплового поля за допомогою диференціального рівняння теплопровідності. Стратифіковано стержневий перетворювач до трьох шарів, записані умови однозначності. Граничні умови визначені використанням: двох рівнянь для рівності температури на поверхні перетворювача, двох рівнянь для рівності температури в точках контакту шарів, чотирьох рівнянь для рівності теплових потоків в точках контакту шарів та на границях тіла з оточуючою середою. Компенсований циліндричний перетворювач з конструкцією, що заповнена рідиною, стратифіковано до п'яти шарів, записані умови однозначності. В тому числі дванадцять граничних умов: два рівняння для рівності температури на поверхні перетворювача, чотири рівняння для рівності температури в точках контакту шарів; чотири рівняння для рівності теплових потоків в точках контакту шарів та два рівняння для рівності теплових потоків на границях тіла з оточуючою середою. Для обох моделей розв'язане диференціальне рівняння теплопровідності для трьох і п'яти шарів, знайдені невідомі константи інтегрування. Побудовано двовимірні графіки теплового поля стержневого та циліндричного перетворювача. Це дозволило результати математичних розрахунків навести у наглядному вигляді.

В *третьому розділі* проведено моделювання та експериментальне дослідження теплового поля стержневого перетворювача. Окремо зроблено моделювання теплового поля циліндричного перетворювача компенсованої конструкції, що заповнена рідиною, та для моделі з герметизацією торців. Обґрунтований вибір програмного середовища для моделювання теплових полів. В результаті моделювання було отримано дво- та тривимірні графіки теплових полів стержневого та циліндричного перетворювачів та графік перехідного процесу нагрівання. В результаті експериментального дослідження отримані графіки нагрівання та охолодження п'єзокерамічного електроакустичного перетворювача стержневого типу в трьох точках: на обох накладках та активному елементі.

Другий і третій розділи побудовані логічно. Наведені приклади знаходження теплового поля для конкретних перетворювачів. Проведене визначення теплового поля, розроблені методики досліджень. Запропоноване спрощення конструкцій перетворювачів для облегшення розрахунку. Тут присутні моделювання та експериментальне дослідження, що дозволило порівняти отримані результати.

*Четвертий розділ* присвячено методам зменшення температури п'єзокерамічних випромінюючих перетворювачів. Обговорені конструкторські методи зниження температури розігріву. Досліджена ефективність пасивних та активних методів охолодження стержневого перетворювача, шляхом моделювання його теплових полів. Досліджено

вплив конструкції корпусу на виникнення теплових полів у стержневому перетворювачі. Розглянута ефективність конструкторських методів охолодження. Проведено дослідження впливу пасивних методів охолодження на зміщення резонансної частоти коливальної системи. Отримані графіки залежності зміщення резонансної частоти стержневого перетворювача в залежності від зміни тильної накладки. Розглянуто, як це сприяє зменшенню нагріву перетворювача.

Автор запропонувала методику аналітичного розрахунку теплового поля, засновану на розв'язанні рівняння теплопровідності, видала рекомендації щодо зменшення температури нагріву. Рекомендації по зменшенню температури розігріву носять як загальний характер для конструювання перетворювачів, наприклад для вибору матеріалу, так і більш конкретні конструктивні зміни у стержневих конструкціях електроакустичних п'єзокерамічних перетворювачів. Ці результати дозволили обумовити практичну цінність дисертаційної роботи.

#### **7. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

У дисертаційній роботі мета і задачі дослідження поставлені чітко. Автор досить коректно використала відомі наукові методи обґрунтування отриманих результатів, висновків і рекомендацій. Дисертантом вивчені та критично проаналізовані відомі досягнення і теоретичні положення інших авторів. Проведений аналітичний огляд літературних джерел достатній, наявні посилання, що підтверджують використані ствердження. Положення дисертації ґрунтуються на відомих досягненнях фундаментальних і прикладних наукових дисциплін.

У роботі автор грамотно використовує методи математичної фізики, коректно ставить початкові й граничні умови. Висновки основані на розрахунках та моделюванні, вони логічні і послідовні. Висновки та рекомендації носять чіткий характер та направлені на використання результатів наукових досліджень у впровадження.

Достовірність результатів, застосованих методів розрахунку теплового поля підтверджувалася відповідністю теоретичних і експериментальних досліджень.

В дисертаційній роботі заявлено 7 пунктів наукової новизни отриманих результатів, серед яких 5 – вперше.

Основними науковими здобутками авторки є знаходження теплових полів аналітичним методом для стержневого перетворювача, порівняння результатів розрахунку теплових полів двох типів конструкцій перетворювачів для аналітичного розрахунку та комп'ютерного моделювання. Автором використані сучасні методи програмування.

Дослідження теплових полів перетворювачів з урахуванням додаткових елементів конструкції, зокрема корпусу. Ефективне використання активного та пасивного охолодження для перетворювача, пропонування зміщення резонансної частоти при застосуванні пасивних методів охолодження. Ці положення наукової новизни відображено в публікаціях, що забезпечують

повноту викладення здобувачем основних результатів дисертаційної роботи у публікаціях.

У цілому, результати, отримані авторкою, є новими науковими знаннями.

Отримані в роботі результати можуть використовуватись у навчальному процесі вищих навчальних закладів України, у тому числі НТУУ "КПІ" імені Ігоря Сікорського при підготовці інженерів-акустиків.

**8. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.** За темою дисертації опубліковано 6 робіт серед них 3 статті та 3 тез на міжнародних конференціях. Статті опубліковано в 2 наукових фахових виданнях України категорії Б для спеціальності 171 Електроніка та 1 в іноземному міжнародному фаховому науковому виданні держави, що входить до Європейського Союзу. Така кількість достатня згідно вимогам щодо експерименту з присудження звання доктор філософії. Результати дисертаційної роботи доповідались на 3 міжнародних конференціях, що свідчить про достатню апробацію дисертаційного дослідження. Рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам ДАК України.

**9. Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації.** Дисертаційну роботу написано українською мовою. Результати дослідження представлені у доступному для сприйняття та використанні стилі. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів з висновками по кожному, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків, що задовольняє вимогам необхідній структурі дисертації.

#### **10. Загальні зауваження до дисертаційної роботи**

1. Вважаю, що у формулюванні теми дисертаційної роботи акцент треба було б зробити на те, що робота присвячена дослідженням насамперед п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку. Тому краще було б сформулювати тему так: «Вплив теплових полів на конструкції п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку».
2. В другому розділі формули недостатньо пронумеровані. Наприклад, на сторінках 49-52 та 58-60, важливими є рівняння теплопровідності для кожного з шарів і знайдені невідомі  $C$ , на які потрібно дати посилання.
3. В першому і четвертому розділах описується важливість вибору матеріалу електродів, але в другому та третьому розділах використовується спрощення конструкції та їх відносять до тих елементів, що не впливають на теплове поле.
4. В роботі присутні орфографічні помилки. Зокрема у формулюванні загальних висновків у дисертації не треба починати формулювання пунктів із слів «було», «був» и тим паче.

Зазначені зауваження не знижують цінності дисертаційної роботи та не є критичними.

### 11. Відповідність встановленим вимогам.

Зміст дисертації відповідає спеціальності 171 Електроніка за напрямом 17 Електроніка та телекомунікації.

Вважаю, що дисертація Перчевської Людмила Вадимівни «Теплові поля конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 Електроніка за напрямом 17 Електроніка та телекомунікації є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, дисертація має практичну цінність і відповідає вимогам МОН України щодо дисертацій, які подаються на здобуття наукового ступеня доктора філософії,

а її автор Перчевська Людмила Вадимівна заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 – Електроніка.

Офіційний опонент,  
професор кафедри механотроніки,  
Дніпровського національного університету  
імені Олеся Гончара,  
доктор технічних наук, професор,  
Відмінник Освіти України



Г. І. Сокол

Підпис офіційного опонента доктора технічних наук,  
професора Сокол Г. І. засвідчую

Вчений секретар Дніпровського  
національного університету імені Олеся Гончара  
к. ф. - м. н., доцент



Т. В. Ходанен