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

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Перчевська Людмила Вадимівна

УДК 534.232

ДИСЕРТАЦІЯ

Теплові поля конструкцій п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку

171 Електроніка

17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

______________________________________ , Л. В. Перчевська

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Дрозденко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Перчевська Л.В. Теплові поля конструкцій п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 «Електроніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню теплових полів для п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, що працюють в режимі випромінювання звуку.

Об’єкт дослідження – теплові процеси в конструкціях п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку.

Предмет дослідження – 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.

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 теплових полів перетворювачів, надана інформація про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Надано перелік публікацій за темою дисертаційної роботи та апробація результатів із зазначенням особистого внеску.

В першому розділі проведено літературний огляд найбільш вразливих до теплового впливу типів п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, галузі застосування, в яких описується проблема нагріву перетворювачів. Описані проблеми притаманні галузям, що використовують п’єзокерамічні електроакустичні перетворювачів, які нагріваються. Розглянуті механічні, вібраційні, електричні та теплові навантаження, які виникають в перетворювачі при роботі. Також розглянуто важливість попереднього навантаження п’єзоелементів, його взаємодія з експлуатаційними навантаженнями в перетворювачах, зміна значень граничного допустимого навантаження. Проаналізовані причини виникнення нагріву перетворювачів, безпечна робоча температура. Запропонований поділ негативних наслідків нагріву перетворювачів на три групи: обмеження, що накладають на прилад через збільшення нагріву; зміна параметрів приладу і характеристик матеріалів зі збільшення температури; незворотні наслідки нагріву, з їх подальшим описом. Розглянуто енергетичні втрати (діелектричні, п'єзоелектричні і механічні) в п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачах. Проаналізовані механізми теплових процесів в перетворювачах. Розглянуто роботи з різними методами визначення температури розігріву перетворювачів та їх тепловими полями.

В другому розділі описана методика аналітичного розрахунку теплового поля за допомогою розв’язання диференціального рівняння теплопровідності Фур’є.

Стратифіковано стержневу конструкцію п’єзокерамічного електроакустичного перетворювача до трьох шарів, що імітують поле нескінченних пластин. Записані умови однозначності (геометричні умови, фізичні умови, часові умови, граничні умови). В тому числі вісім граничних умов: два рівняння для рівності температури на поверхні перетворювача, два рівняння для рівності температури в точках контакту шарів, по два рівняння для рівності теплових потоків в точках контакту шарів та на границях тіла з оточуючим середовищем. Розв'язане диференціальне рівняння теплопровідності для трьох шарів, знайдені шість невідомих констант, що залишились після інтегрування. Представлено результат у вигляді розв’язку рівнянь теплопровідності та графіку теплового поля.

Компенсований циліндричний рідиннозаповненої конструкції п’єзокерамічний електроакустичний перетворювач 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 оточуючим середовищем. Для моделі розв'язане диференціальне рівняння теплопровідності для п’яти шарів, знайдені десять невідомих констант, що залишились після інтегрування. Отримано розв’язки рівняння теплопровідності для кожного шару та двовимірний графік теплового поля циліндричного перетворювача.

В третьому розділі проведено моделювання та експериментальне дослідження теплового поля стержневого перетворювача і моделювання циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповеної конструкції та для моделі з герметизацією торців. Обґрунтований вибір програмного середовища для моделювання теплових полів. В результаті моделювання було отримано дво- та тривимірний графіки теплових полів стержневого та циліндричного перетворювачів та графіки перехідного процесу нагрівання. В результаті експериментального дослідження отримані графіки нагрівання та охолодження п’єзокерамічного електроакустичного перетворювача стержневого типу в трьох точках: на тильній накладці, активному елементі та випромінюючій накладці. Порівняно графіки перехідного процесу нагрівання, отриманих шляхом експериментального вимірювання та моделювання теплового поля.

Четвертий розділ присвячено методам зменшення температури п’єзокерамічних випромінюючих перетворювачів. Обговорені конструкторські методи зниження температури розігріву шляхом вибору матеріалів для електродів, накладок, активних матеріалів. Запропоновані пасивні та активні методи охолодження, що використовуються для стержневих перетворювачів. Досліджена ефективність пасивних та активних методів охолодження стержневого перетворювача, шляхом моделювання його теплових полів. Досліджено вплив корпусу на теплові поля стержневого перетворювача та на 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 на ту, що сприяє зменшенню нагріву перетворювача.

Практична значимість результатів:

- 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 типа: 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» до дисциплін «Основи конструювання в електроніці» та «Конструювання акустичних приладів та систем».

Ключові слова: п'єзокерамічний електроакустичний перетворювач, теплові поля, нагрівання, експлуатаційні навантаження, теплові навантаження, диференціальне рівняння теплопровідності Фур’є, моделювання теплового поля, пасивні методи охолодження, активні методи охолодження.

SUMMARY

Perchevska L.V. Thermal fields of piezoceramic electroacoustic transducers in sound radiation mode.

Thesis for the degree of Philosophy Doctor, in specialty 171 “Electronics”. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

The dissertation is dedicated to the study of thermal fields for piezoceramic electroacoustic transducers operating in the mode of sound radiation.

The object of research - thermal processes in the construction of piezoceramic electroacoustic transducers in the mode of sound radiation.

The subject of research - thermal fields of piezoceramic electroacoustic transducers in the mode of sound radiation.

The dissertation contains the following scientific results:

- for the first time an analytical calculation method was used to find the thermal fields of piezoceramic electroacoustic transducers of the rod type.
- for the first time a comparison of the analytical method of calculation and computer modeling to find the thermal fields of typical structures of piezoceramic electroacoustic transducers of rod and cylindrical types.
- for the first time the thermal fields of rod piezoceramic electroacoustic transducers were investigared taking into account additional structural elements, in particular the housing.
- for the first time the efficiency of active and passive cooling for the transducers is investigated.
- for the first time the shifting of the resonant frequency of the rod type transducers when using passive cooling methods is investigated.
- constructive measures to ensure the normal thermal regime of rod transducers were further developed: the use of cooling inserts, cooling layers of special mixtures, special forms of transducers plate.
- the further development of methods of research of thermal fields used at creation of designs of modern piezoceramic electroacoustic transducers is received.

The content of the dissertation research is presented in four sections, in which the main results of the work are presented and substantiated.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation, formulates the purpose and objectives of the study, describes the research methods of thermal fields of transducers, provides information about the scientific novelty and practical significance of the results. The list of publications on the topic of the dissertation and approbation of the results with the indication of the personal contribution is given.

In the first chapter, a literature review of most vulnerable to heat exposure piezoceramic type electroacoustic transducers and areas of application that describe the problem of heating transducers. It is described problems are specific to industries that use piezoceramic electroacoustic transducers that heating. Mechanical, vibration, electrical and thermal loads that occur in the transducer during operation are considered. The importance of preloading of piezoelectric elements, its interaction with operational loads in transducers, change of values of maximum admissible loading are also considered. The causes of transducers heating and energy losses in piezoceramic electroacoustic transducers are analyzed. The classification of negative consequences of heating of transducers into three groups is offered: limitations imposed on the device due to increased heating; change of parameters of the device and characteristics of materials on temperature increase; destructive effects of the heating, with their subsequent description. Energy losses (dielectric, piezoelectric and mechanical) in piezoceramic electroacoustic transducers are considered. Mechanisms of thermal processes in transducers are analyzed. Works with different methods for determining the heating temperature of transducers and their thermal fields are considered.

The second chapter describes the method of analytical calculation of the thermal field by solving the differential equation of thermal conductivity of Fourier.
The rod structure of the piezoceramic electroacoustic transducer is stratified into three layers that simulate the field of infinite plates. Uniqueness conditions are recorded (geometric conditions, physical conditions, time conditions, boundary conditions). Including eight boundary conditions: two equations for the equality of temperature on the surface of the transducer, two equations for the equality of temperature at the points

of contact of the layers, two equations for the equality of heat fluxes at the points of contact of the layers and at the boundaries of the body with the environment. The differential equation of thermal conductivity for three layers is solved, six unknown constants remaining after integration are found. The result is presented in the form of a solution of the equations of thermal conductivity and the graph of the thermal field.

The compensated cylindrical liquid-filled piezoceramic electroacoustic transducer is stratified into five layers, the conditions of uniqueness are recorded. Including twelve boundary conditions: two equations for the equality of temperature on the surface of the transducer, four equations for the equality of temperature at the points of contact of the layers; four equations for the equality of heat fluxes at the points of contact of the layers and two equations for the equality of heat fluxes at the boundaries of the body with the environment. For the model, the differential equation of thermal conductivity for five layers are solved, and ten unknown constants remaining after integration are found. Solutions of the thermal conductivity equation for each layer and a two-dimensional graph of the thermal field of a cylindrical transducer and for the end-sealed model are obtained.

In the third chapter, modeling and experimental study of the thermal field of the rod transducer and modeling of the cylindrical transducer of the compensated fluid-constructed structure are carried out. The choice of software environment for modeling thermal fields is substantiated. As a result of modeling, two- and three-dimensional graphs of the thermal fields of the rod and cylindrical type of transducers and graphs of the heating transition process are obtained. The experimental study obtained graphs of heating and cooling of the piezoceramic electroacoustic transducer of the rod type at three points: on both plates and the active element. The graphs of the heating transition process obtained by experimental measurement and modeling of the thermal field are compared.

The fourth chapter is devoted to methods of reducing the temperature of piezoceramic radiating transducers. Constructional methods for reducing the heating temperature by choosing materials for electrodes, plates, active materials are discussed. Passive and active cooling methods used for rod transducers are proposed. The efficiency of passive and active methods of cooling the rod transducer by modeling its thermal fields is investigated. The influence of the housing on the thermal fields of the rod transducer and the efficiency of design cooling methods are investigated. Investigation of the influence of passive cooling methods on the shifting of the resonant frequency of the oscillatory system. The graphs of the dependence of the shifting of the resonant frequency of the rod transducer depending on the change of the rear plate to one that helps to reduce the heating of the transducer are obtained.

Practical significance of the results:

- methods of calculation of thermal fields for radiating piezoceramic electroacoustic transducers of rod and cylindrical types are developed.
- it is developed recommendations for the application of design measures to reduce the heating temperature of rod type transducers: using of the cooling inserts, cooling layers of special mixtures, special forms of plates, active cooling.
- the obtained dependences, according to which it is possible to take into account the influence of additional structural elements intended for cooling the transducers on the resonant characteristics of the transducers.

These techniques and recommendations will be useful in the design of rod transducers. The given recommendations on reduction of the maximum temperature of heating of the transducer are useful for design of transducers in which thermal loadings go beyond admissible norms.

The results are implemented in the educational process of the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" in the disciplines "Fundamentals of design in electronics" and "Design of acoustic devices and systems".

Keywords: piezoceramic electroacoustic transducer, thermal fields, heating, operating loads, thermal loads, Fourier differential thermal equation, thermal field modeling, passive cooling methods, active cooling methods.

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

1. 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.

2. L. Perchevska, O. Drozdenko, K. Drozdenko, and O. Leiko, “Study of the influence of the housing on the cooling efficiency of the piezoceramic electroacoustic Langevin-type transducer” Technol. Audit Prod. Reserv., vol. 3, no. 1(59), pp. 50–55, Jun. 2021, DOI: 10.15587/2706-5448.2021.231279.

3. Перчевська Л. В., Дрозденко О.І., Дрозденко К.С., і Лейко О.Г.. «Забезпечення теплового режиму роботи стержневих конструкцій п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів». Мікросистеми, Електроніка та Акустика, вип. 24, вип. 5, Жовтень 2019, с. 56-63, doi:10.20535/2523-4455.2019.24.5.190452.

4. O. Drozdenko, K. Drozdenko, and L. Perchevska, “Features of thermal fields calculation for cylindrical piezoceramic transducers with compensated design” in 2018 IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW), 2018, pp. 44–47.

5. O. Drozdenko, K. Drozdenko, and L. Perchevska, “Methods for Analyzing the Thermal Field of Rod Type Piezoceramic Electroacoustic Transducer” in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019 - Proceedings, 2019, DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783805.

6. O. Drozdenko, K. Drozdenko, O. Leiko, and L. Perchevska, “The Thermal Fields Analysis of Sealed Cylindrical Piezoceramic Electroacoustic Transducers Compensated Construction” in 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2020, pp. 815–819, DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088757.

ЗМІСТ

ВСТУП

Обгрунтування вибору теми дослідження.

П’єзокерамічні електроакустичні перетворювачі (ПЕП) активно використовуються протягом більш ніж 70 років. Під час роботи в режимі випромінювання акустичної енергії ці перетворювачі нагріваються внаслідок електричних та механічних втрат в елементах їх конструкцій. Для довготривалої та надійної роботи ПЕП мають бути розраховані на навантаження, які виникають в процесі роботи. Адже на сьогоднішній день значна частина причин виходу з ладу випромінювачів пов’язана саме з надмірними тепловими навантаженнями.

Питанням теплових полів і забезпеченням нормального теплового режиму роботи перетворювачів займались і продовжують займатись багато вчених: Хмелев В.Н., Ільченко Е.В., Богуш М.В., Богородський В.В., Зубарев Л.А., Корепін Е.А., Якушев В.И., Дрозденко О.І., Лейко О.Г., Умеда М. (Umeda, M), Накамура К. (Nakamura, K.), Такахаші С. (Takahashi, S.), Учино К. (Uchino, K), Матісон А. (Mathieson, A), Ли Х. (Lee H.). За останні 10 років описано багато досліджень з приводу теплових полів, температури нагріву перетворювачів та втрат енергії, що йдуть на нагрів в п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачах. З плином часу вимоги до надійності, тривалості роботи, вихідної потужності, амплітуди та швидкості коливань ростуть, що диктує необхідність більш стійких до експлуатаційних навантажень перетворювачів. Економічні вимоги вимагають дослідження теплових полів ще на етапі конструювання. П’єзокерамічні перетворювачі знаходять нове застосування, а п’єзокераміка вкрай чутлива до підвищення температури, і проблема теплового навантаження буде залишатись актуальною ще довгий час. Проведений літературний огляд показав, що найбільшої загрози зазнають п’єзокерамічні електроакустичні перетворювачі саме в режимі випромінювання звуку.

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.

Об'єкт дослідження – теплові процеси в конструкціях п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку.

Предмет дослідження – теплові поля конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів в режимі випромінювання звуку.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати наступні задачі:

1. Проаналізувати конструкції п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів з точки зору небезпеки 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.

Методи дослідження.

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. Експериментально теплові поля стержневого перетворювача вимірювались точково за допомогою термопар, під'єднаних до цифрових термометрів. Резонансні частоти перетворювачів розраховувались за трансцендентним рівнянням графічним методом та моделюванням методом скінчених елементів в SolidWorks.

Наукова новизна.

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 ПЕП стержневого та циліндричного типів.

- вперше досліджено теплові поля стержневих ПЕП 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 ПЕП: 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 ПЕП.

Особистий внесок здобувача.

Усі результати, наведені у дисертаційній роботі і винесені на захист, отримані особисто автором.

У науковій роботі [1], опублікованій у співавторстві, здобувачем особисто виконано наступне: розрахована резонансна частота, проведено частотний аналіз перетворювача шляхом комп'ютерного моделювання, виконані різновиди тильної накладки для пасивного охолодження перетворювача. Побудовані графіки залежності резонансної частоти від форми і геометричних розмірів тильної накладки. В роботі [2] автором розроблені моделі перетворювача з урахуванням корпуса, побудовані графіки теплових полів. Побудовані теплові поля та проаналізована ефективність пасивних та активних систем охолодження п'єзокерамічного перетворювача. В роботі [3] автором аналітичним методом розраховано теплове поле п'єзокерамічного перетворювача, побудовано графік теплового поля. Шляхом моделювання отримано розподіл теплового поля п'єзокерамічного перетворювача, побудований графік перехідного процесу розігріву перетворювача.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено методики розрахунку теплових полів для випромінюючих п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів стержневого та циліндричного типів.
- розроблені рекомендації щодо забезпечення нормального теплового режиму роботи перетворювачів стержневого типа.
- отримані залежності, за якими можливо врахувати вплив додаткових елементів конструкції, призначених для охолодження перетворювачів, на резонансні характеристики ПЕП.

Дані методики та рекомендації будуть корисні при конструюванні стержневих перетворювачі. Наведені рекомендації щодо зменшення максимальної температури розігріву 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» до дисциплін «Основи конструювання в електроніці» та «Конструювання акустичних приладів та систем»

Апробація результатів дисертації.

Матеріали дисертаційних досліджень обговорювалися на конференціях та семінарі:

1. Міжкафедральний науковий семінар факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, м. Київ, 27 січня 2021р.

2. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 22-24 квітня 2020 р. м. Київ.
3. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019), 16-18 квітня 2019 р м. Київ.
4. 2018 IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW), Conference Proceedings, 2–6 жовтня 2018 р м. Київ.

Публікації.

Основні результати дисертаційної роботи представлені у 6 публікаціях наукових робіт, у тому числі в 3 статтях у наукових фахових виданнях, з яких 2 у наукових виданнях України категорії Б; 1 у іноземному міжнародному фаховому науковому виданні; 3 тези доповіді у збірниках матеріалів конференцій, дві з яких включені до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Структура та обсяг дисертації.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 91 найменувань та 4 додатків. Робота містить 39 рисунків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 127 сторінок.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД. АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ КОНСТРУКЦІЙ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Електроакустичні перетворювачі застосовуються для перетворення електричної енергії в акустичну в режимі випромінювання та зворотного перетворення в режимі прийому. Такі перетворювачі можуть функціонувати самостійно або бути у складі антен акустичних комплексів, очисних систем та інших. Перетворення енергії здійснюється завдяки активному елементу, найчастіше виготовленому з п'єзокераміки, тому такі перетворювачі називають п'єзокерамічними електроакустичними перетворювачами (ПЕП).

За своєю формою перетворювачі можуть бути циліндричні, стержневі, пластинчасті, арочні та інші, спеціальної форми. Широко розповсюджені стержневі перетворювачі через можливість випромінювати широкий діапазон частот акустичних хвиль.

Важливо аналізувати теплові поля потужних перетворювачів, адже вони більш схильні до високих експлуатаційних навантажень. В багатьох галузях використання ПЕП підвищення температури перетворювача критично впливає на його спроможність працювати в нормальному режимі. Проблема теплової міцності зачепила майже всі сфери застосування п'єзокерамічних перетворювачів великої потужності. В хірургічній медицині описують великий нагрів стержневих перетворювачів, як один із факторів зміни резонансної частоти [4] і обмежень по режиму використання, в хірургічній офтальмології [5–7] також присутні недоліки, пов'язані з збільшенням температури перетворювача. Збільшений нагрів присутній також і в п'єзоелектричних трансформаторах, такі як тип Розена [8], резонаторах [9], ультразвуковому технологічному обладнанні [10, 11], прилади для промислової обробки [12], та в гідроакустиці [13, 14]. Перетворювачі типу Ланжевен (перетворювач стержневого типу) для генерування потужного ультразвуку використовують в: ультразвуковій зварці, різці, сонохімії (звукохімія) [12] також потребують дослідження теплових полів і зменшення температури максимального нагріву.

1.1. Потужні випромінюючі перетворювачі

Потужні перетворювачі використовують там, де необхідно організувати активний вплив на середовище, а не діагностичний (медична діагностика, вимірювання рівня, витрат, моніторинг). Для п’єзотрансформоторів справедливим є наступний розподіл по потужності що передається на навантаження: малопотужні (в них використовують один п'єзоелемент) – до 1 Вт, середньої потужності (використовують 1-6 п'єзоелементів) – до 50 Вт, та п'єзотрансформатори великої потужності (складені) – 50 Вт і більше. Для п'єзоелектричних трансформаторів звичайна потужність вихідного імпульсу 75 Вт. А для п'єзокерамічних офтальмологічних приладів, вихідна потужність більше 20 Вт вже є великою і такі прилади вважають потужними, через дуже маленьку випромінюючу площу.

П’єзокерамічні матеріали поділяються на тверді та м’які. Процедура легірування (або допінгу) п'єзокераміки вважається одним із способів для варіювання ефективності. Якщо брати конкретно PZT (аналог ЦТС) то її склад цирконата-титанат свинцю $PbTiO_3$ — $PbZrO_3$. В м'якої п'єзокераміки введення акцепторної домішки [15], додавання заліза, марганцю або хрому закріплює доменні стінки, що призводить до зменшення руху доменної стінки. Тоді п'єзокераміка стає твердою (або її також називають жорсткою). Це в свою чергу призводить до зменшення значень п’єзоелектричних констант та електромеханічного зв’язку, однак, таке внесення суттєво підвищує коефіцієнт механічної добротності. М'яку п'єзокераміку використовують, як правило, в приладах які вимагають швидкого часу реагування та високої чутливості, однак через її низьке значення механічної добротності, активніше генерується тепло і це може стати проблемою при роботі на резонансі. Тверда п'єзокераміка краще підходить в приладах з високою інтенсивністю, де вигода, отримана від великого значення добротності перевищує користь над високими властивостями м'якої п'єзокераміки [4].

П’єзокерамічні матеріали класифікуються за хімічним складом, з одного боку, та за специфічними умовами застосування. Наприклад, деякі виробники п'єзокераміки розподіляють її для наступних застосувань: потужні перетворювачі, датчики, системи точного позиціонування. І для приладів таких цілей порівнюють наступні характеристики п'єзокераміки: відносна діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат, коефіцієнт зв'язку, п'єзомодуль d_{33} (для потужних перетворювачів ці параметри найменші), а от механічна добротність – найбільша для потужних перетворювачів [16].

Для перетворювачів, що виробляють високу потужність краще підходить використання жорсткої п'єзокераміка. По-перше, вона менше нагрівається [17] і має більшу температуру Кюрі. Жорстка п’єзокерамік характеризується також, механічною добротністю більше 1000 (зазвичай 1000 - 2000, але використовують й з меншим значенням механічної добротності), та модулем Юнга достатньо високої величини, для забезпечення високої потужності стержневого перетворювача. Після відсіювання п'єзокераміки по основним параметрам необхідно обирати серед тої п’єзокераміки, що має більше значення діелектричних констант та статичну ємність (static capacitance) [18].

Важливим параметром, який безпосередньо впливає на виділення тепла, є механічна добротність. Добротність - кількісна характеристика резонансних властивостей коливальних систем, яка вказує у скільки разів амплітуда вимушених коливань при резонансі перевищує амплітуду вимушених коливань на частоті багато нижче резонансної (в 2.7 разів) при однаковій амплітуді збуджуючої сили [19]. Або інакше визначення, що механічна добротність системи – це відношення накопиченої енергії в системі до енергії, що витрачається за один період коливань. Механічна добротність характеризує втрати енергії в матеріалі на внутрішнє тертя, якщо узагальнити.

В [20] пояснюють особливу важливість коефіцієнта механічної добротності для приладів з високою потужністю так: загалом, матеріали з високим коефіцієнтом механічної добротності (низькі механічні втрати) мають низькі діелектричні втрати. Усереднене за часом розсіювання потужності на одиницю об’єму п’єзоелектричних матеріалів пропорційне діелектричним та механічним коефіцієнтам втрат, де механічні втрати, як правило, є основним джерелом розсіювання потужності при резонансі, тоді як діелектричні втрати є основним фактором в режимі не резонансу.

В роботі [4] описано, що для досягнення оптимальної продуктивності перетворювачів типу Ланжевен слід шукати компроміс між використанням більшої кількості тонких п’єзоелектричних елементів та меншої кількості товстих елементів. Оптимізація товщини п'єзокераміки, що використовується в активному елементі перетворювача, може бути важливою, і з точки зору зменшення нагріву. Чим тонший п'єзокерамічний диск, тим краща рівномірність електричного поля, тим вище ефективний коефіцієнт електромеханічного зв'язку та нижчий його опір. Однак зменшення товщини п’єзокерамічного диска збільшує кількість елементів у межах визначеної довжини активного елемента, що, у свою чергу, збільшує витрати на виготовлення перетворювача, а також збільшує значення ємності. Збільшення кількості п'єзокерамічних елементів також може призвести до неефективності через механічні втрати (спричинені збільшенням кількості з'єднувальних елементів) та проблеми з збудженням. Оскільки занадто багато елементів можуть викликати зсув фаз між елементами, змушуючи їх протидіяти коливанням один одного. З іншого боку, більш товсті п'єзокерамічні елементи зменшують складність перетворювача, отже, знижують виробничі витрати, а також механічні втрати (тут мова про з’єднання цих елементів). Однак більш товсті елементи також призводять до менш рівномірного електричного поля при заданій напрузі, одночасно збільшуючи опір та внутрішній нагрів.

Потужні випромінювачі заслуговують на особливу увагу дослідників над температурними поля перетворювача. Вони є важливою складовою багатьох сфер застосування електроакустичних п'єзокерамічних перетворювачів. Для таких перетворювачів вкрай важливо знайти оптимальний баланс при виборі активного елементу – п'єзокераміки. Тому що, для можливості потужного випромінювання п'єзокераміці необхідно мати високу механічну добротність, а її збільшення призводить до падіння інших характеристик.

1.2. Аналіз навантажень, які виникають при роботі п’єзокерамічних перетворювачів та діють на їх конструкції

В процесі роботи на перетворювач діють експлуатаційні навантаження (механічні, вібраційні, електричні, кавітаційні, теплові), найбільш небезпечні – теплові навантаження. Границею деструктивного механічного навантаження на п’єзокераміку є $\sigma_{мех}$, а теплового навантаження $T_{Кюрі}$.

Вихідна потужність перетворювачів обмежується механічними, електричними або ж тепловими навантаженнями. В перетворювачах з низькою механічною добротністю, межею є максимальні напруженості електричного поля, якщо висока добротність, то обмежуючий фактор – механічні напруження. При великому робочому циклу, понад 20%, або безперервній роботі основним лімітом на обмеження є теплові навантаження [21]. Однак, навіть при подоланні теплового навантаження (застосовуючи додаткові системи охолодження) і начебто прилад мав би мати змогу передавати більшу потужність, то разом із тим збільшуватимуться електричні та механічні напруження, що також призведе до руйнування п'єзокераміки.

Режими роботи поділяють на безперервний і переривчастий (непостійний або імпульсний). В не постійному режимі, прилад працює короткий час і після цього “має можливість” охолонути, тому в такому варіанті більшу небезпеку несуть *механічні напруження* в п'єзокераміці. Руйнівне напруження механічного поля залежить від властивостей п'єзокерамічного матеріалу [8].

Одночасний вплив електричного поля і високої температури знижують фактичну температуру Кюрі. Тоді обертання домена починає деполяризувати кераміку вже близько (150-300)^{0}С для твердої п’єзокераміки, коли її температура Кюрі близько 300^{0}С [8].

Критично те, що навантаження діють на головний елемент перетворювача – п'єзокераміку, яка є дуже чутливим матеріалом. Пружні, діелектричні, п'єзоелектричні характеристики п'єзокераміки дуже чутливі щодо напружень. В [22] досліджували нелінійні ефекти від *вібраційних* та *електричних напружень* в трьох зразках п'єзоелектричної кераміки. Виявили, що в режимі резонансу на нелінійність характеристик впливає більше вібраційне напруження, аніж електричне поле. При низькому вібраційному напруженні, коефіцієнт механічних втрат Q_m^{-1}, модуль Юнга, та п'єзоелектрична константа d_{31}, залишаються лінійними, але після деякого порогу, вони починають поводитись нелінійно. Чим більше п'єзокераміка м'якіша, тим виразніше проявляється нелінійність.

Щодо вібраційних навантажень, то їх дуже важко оцінити окремо від теплових. Метод вивчення впливу *вібраційного навантаження* без збільшення температура зразка для перетворювача типу Ланжевен детально описано в [23]. Він полягає в тому, що напруга подається в імпульсному (burst) режимі і температура не встигає підвищується. Через кілька років декілька з тих авторів видали ще одну статтю, де вже оцінювали зміни характеристик п'єзокераміки окремо в залежності від температурних та вібраційних напружень. В цьому джерелі [17] було виявлено, що коефіцієнт механічних втрат (mechanical loss factor) Q_m^{-1} (тобто tgσ) чутливий до обох напружень (вібраційних та теплових), в той час як пружня деформація/піддатливість (elastic complience) s_{11}^E, діелектрична константа ε_{33}^T, п'єзоелектрична константа d_{31} були чутливі тільки до температури і не чутливі до вібрації. При тому, що різниця підвищення температури зразків від кімнатної температури було до 30^{0}C.

Також для вивчення впливу вібраційних навантажень на перетворювач типу Ланжевен досліджували зміну положення активного елементу відносно вузлового перерізу. Щоб дослідити вплив розташування п'єзокерамічного елементу, а не вплив підвищеної температури, на вібраційну характеристику перетворювачів, перетворювачі збуджувались за умов постійної напруги з сигналом сплеску синусів на кожному прирості частоти розгортки [12]. В результаті цієї роботи прояснили, що при постійній температурі перетворювача, пружня деформація змінюється пропорційно квадрату коливального напруження, при збудженні вище порогу коливань. Таким чином, очевидно, що розміщення п'єзокерамічного пакета подалі від вузлового перерізу може зменшити вплив на зміщення резонансної частоти через високі вібраційні напруження.

Разом з експлуатаційними навантаженнями також необхідно наголосити на якість попереднього навантаження, адже вони пов'язані. Попереднє навантаження традиційно застосовується в перетворювачах Ланжевена шляхом затиску перетворювач разом через одну центральну або кілька периферійних шпильок чи болтів. Адже попереднє навантаження впливає на граничну величину експлуатаційних навантажень та їх наслідки.

Основна роль болта попереднього навантаження - це забезпечення попереднього напруження в п'єзокераміці (як відомо, механічна міцність більш висока на стиск ніж на розтягування), також важливо саме рівномірне напруження п’єзокераміки, та запобігання розриву або розтягуванню з'єднання, тобто розшарування клею, наприклад. Але в той же час надмірне попереднє навантаження призводить до вираженого розпаду, нестабільного опору і старіння в процесі експлуатації п'єзокераміки, механічної деполяризації. В такому випадку механічні втрати п'єзокераміки різко зростуть, що призведе до нагрівання і також пошкодження перетворювача, а також максимальна безпечна робоча температура та температура Кюрі відповідно також може бути знижена. А якщо попереднє напруження недостатнє,то це веде до зниження резонансної частоти, високому імпедансу. Типові значення попереднього навантаження перетворювачів [4] знаходяться в діапазоні від 20 МПа до 80 Мпа. Бажано, щоб шпилька або болт мали дрібну різьбу, а також щільну посадку (вкручування в тильну накладку, наприклад), були узгоджені по коефіцієнтам теплового розширення (коли підвищення температури перетворювача неминуче) і , якщо це можливо, більш теплопровідний матеріал. Дрібна різьба збільшує коефіцієнт тертя між двома різьбових деталей і знижує ймовірність ослаблення шпильки або болта під час роботи.

В процесі роботи на перетворювач діють механічні та електричні навантаження, які супроводжуються також тепловими навантаженнями і їх важко оцінити окремо. Теплові навантаження більше впливають на характеристики п'єзокераміки, за інші.

1.3. Причини виникнення нагріву перетворювачів

Нагрівання перетворювача відбувається завдяки наступним причинам:

- тепловиділення, що відбувається з причини внутрішніх механічних втрат в п'єзокераміці (втрати на тертя) [24];
- діелектричне розсіювання (дисипація) в п'єзокераміці [24];
- демпфування (damping) в п'єзокераміці [24];
- нагрівання п'єзокераміки через протікання через неї змінного електричного струму [10];
- низька електрична проводимість електродів [8, 25]; При збільшенні кількості електродів в п'єзотрасформаторах, збільшилась його теплопровідність і перенос тепла в зовнішнє середовище, за рахунок якого зменшилась температура [8];
- перенесення тепла від пасивної накладки та робочого інструменту [11];
- від нагрівання робочого середовища [13];
- клейове з'єднання.

Клейове з'єднання працює як додаткова жорсткість, маса та демпфер і зменшує активну складову спожитої енергії [26]. Клей має низькі показники теплопровідності, що перешкоджає переносу теплоти з п'єзокераміки до металів, а також низьку максимальну робочу температуру [27].

Ще один аспект, який впливає на теплові напруження і важливість дослідження теплового поля перетворювача – це *безпечна робоча температура п'єзокераміки*. Безпечна робота температура менша за робочу температуру, яка вказується в характеристиках п'єзокераміки, або приблизно половина від температури Кюрі. Ця (безпечна) температура залежить не тільки від типу п'єзокераміки, але також і від попереднього напруження п'єзокераміки. Напруження стиску не можуть перевищувати певної межі, оскільки вони можуть призвести до механічної деполяризації, в іншому випадку механічні втрати кераміки різко зростуть, що призведе до нагрівання [28].

В [27] порівнювали для двошарового перетворювача дві варіації клейового з'єднання. Епоксидний клей та теплопровідна клейова епоксидна смола з сріблом використовувались в якості скріплюючого шару, досліджувалось підвищення температури в залежності від різного збільшення збуджуючого електричного поля. В першому випадку температура на перетворювачі збільшилась майже на 12^0С більше ніж у випадку теплопровідного клею.

Вже на початку 20 століття Ланжевен запропонував поєднувати та попередньо напружувати п'єзоелементи з металевими елементами, тобто додати армування. Така конструкція пропонує деякі переваги перед склеювання клеєм: запобігає напруженню на розтягнення, які можуть призвести до утворення тріщин у крихкій кераміці; відсутні ізолюючі склеювальні шари, які можуть збільшити ємність; також механічне попереднє напруження може посилити п'єзоелектричне зчеплення, і електроди можна легко підключити за допомогою додаткових вставлених листів електродів. Та найголовніше, що важливо для теплових полів - тепло, що утворюється в п'єзокераміці (через електричні та механічні втрати) легше передається металевим деталям.

Також має місце вибір типу перетворювача. З точки зору тепловиділення в не резонансному режим (тобто враховуються тільки діелектричні втрати), то циліндричні перетворювачі менше нагріваються, ніж стержневі в яких п'єзокерамічний елемент в формі куба чи циліндра [25]. Циліндричні перетворювачі мають більшу контакту площу з оточуючим середовищем. Але в стержневих перетворювачах, завдяки попередньому напруженню стягуючим болтом, за умови відсутності клейового з'єднання, збільшується передача тепла від п'єзокераміки до металевих шарів конструкції.

Для того, щоб зрозуміти природу нагрівання приладів, треба знати причини виникнення тепловиділення. Деякі причини можна коригувати, наприклад, зміною матеріалу електродів, зміна способу з'єднання перетворювача, вибір п'єзокераміки.

1.4. Вплив нагрівання на параметри перетворювача та його елементи конструкції

Нагрівання п'єзокераміки зокрема, і перетворювача в цілому може або просто ускладнювати роботу пристрою, або зовсім його вивести з робочого стану.

Розділимо наслідки від нагріву перетворювача на три групи: обмеження, зміна параметрів та характеристик, незворотні наслідки.

До *обмежень* на пристрій в зв'язку з підвищенням температури віднесемо наступне:

- обмеження по тривалості роботи та обмеження по режиму роботи [29]. Наприклад, для усунення теплових ефектів в експерименті з випробовуванням нового перетворювача для промислової обробки (агломерація частинок або зневоднення харчових продуктів) використовували безперервне хвильове збудження [30]. Змінювати режим роботи на преривчастистий дуже популярно в медичній галузі використання ПЕП. Але такі обмеження часто важко реалізувати в робочих умовах збудження великої потужності.
- обмеження по вихідній потужності [31] і вихідному струму. В терапевтичних та хірургічних п'єзокерамічних перетворювачах було показано [32], що при подачі на пристрій 25 Ватт потужності, підвищення температури становить 12^0С на поверхні п'єзокераміки. А при подачі електричної потужності 100 Вт, температура на поверхні досягає більше 50^0С, а у середині п’єзокераміки більше 70^0С. Такі значення вже є критичними та вносять дискомфорт в користування приладами в медицині.
- обмеження на амплітуду коливань [33] і швидкість коливань [34, 35]

Встановлено, що максимальна швидкість коливань буде при підвищені максимальної точки нагріву тільки на 20^0С вище, ніж температура в кімнаті. При подальшому збільшенні подачі електричної енергії, вся додаткова енергія йде лише на нагрів [34].

В хірургічних ріжучих приладах використовують імпульсний режим. Наприклад подають 50 кГц кожні 10 нс, для того щоб мати можливість відслідкувати плавання частоти [4]. Для ультразвукових факоемульсифікаторів використовують режим модуляції сингалу та імпульсні режими, що забезпечує не нагрівання факоголки.

Також існують рекомендації по вибору роботи на антирезонансній частоті для перетворювачів великої потужності, через те, що добротність на антирезонансному режимі вища, ніж на резонансі [36].

Наступна група проблем, пов'язаних з підвищення температури - *зміна параметрів пристрою і характеристик матеріалів,* в наслідок збільшення температури. Таких як:

- зміна робочої частоти [4, 10, 37] і зміщення амплітудно-частотних характеристик вниз по частоті (це відбувається через зміну швидкості поширення звукових коливань в металі конструкції і зміну характеристик п'єзокераміки); Стрибкоподібні зміни зміщення частоти [9]; додаткові коливання. Тут також відіграє роль зміна діелектричних та п'єзокерамічних характеристик п’єзокераміки при збільшенні температури [38]. Нелінійні реакції у вигляді плавання резонансної частоти, пов'язані з підвищенням температури, певною мірою контролюють шляхом зміни сигналу збудження, наприклад, шляхом застосування сплеску замість безперервного збудження [30].
- зміна електричного опору (імпедансу) пристрою. Коливання амплітуди сигналів імпедансу були пов'язані з температурною залежністю ємності п'єзоелектричного датчика. Крім того, зсуви частоти резонансних піків, що виникли внаслідок коливань температури, не були постійними у всьому діапазоні частот, а зростали із збільшенням частоти [39, 40];
- порушення умови узгодження з електронним генератором (як наслідок зміни електричної ємності п'єзоелементів) [41–44];

Електрична ємність деяких марок п'єзокераміки підвищується в 1.5 рази, при зростанні температури до 100^0С [42].

Тангенс кута діелектричних втрат п'єзокераміки з збільшенням температури зменшується. В [36] розрахували зменшення $tg\delta$ з 0.11 до 0.07 приблизно при збільшенні температури до 100^0С.

Виробники PIC для м'якої і твердої п’єзокераміки PZT в матеріалах до зразків надають залежності ємності, поздовжньої резонансної частоти, коефіцієнта зв'язку поперечного коливання k_{31}, коефіцієнт п'єзоелектричного заряду d_{31} від зміни температури, при її зростанні до 160^0C [45].

В стандарті IEEE ще 1988 року [46] пропонували розраховувати температурні коефіцієнти п'єзокерамічних констант (еластичну, п'єзоелектричну та діелектричну константи), бо це важливо для амплітудно частотної характеристики. Обчислення виміряних результатів роблять двома методами. Перший - рівняння швидкості або частоти ультразвуку можна диференціювати в залежності від температури. Другий - константи можуть бути обчислені для кожної з декількох температур, а їх коефіцієнти знайдені шляхом апроксимації кривої.

Властивості п’єзокераміки першого покоління особливо нестабільні при зростанні температури [47], а п’єзоелектричні коефіцієнти м’якої п’єзокераміки більш схильні до змін [48, 49]. Погіршення властивостей п'єзокераміки підвищує необхідну напругу для всієї установки.

До можливих змін параметрів перетворювача відносяться наслідки від різниці коефіцієнтів лінійного теплового розширення. Коли перетворювач працює при високій температурі (неважливо, температура збільшилась через втрати потужності або через високу температуру навколишнього середовища), мається на увазі температура до 100^0C (бо коефіцієнт теплового розширення вказується для таких значень), то матеріали розширюються. Для п'єзокераміки коефіцієнт теплового розширення майже в 10 разів менший від металу (для прикладу, $\alpha_{сталь} = (11.5-13)\cdot 10^{-6} \quad {}^0C^{-1}$, $\alpha_{пк} = (1-4)\cdot 10^{-6} \quad {}^0C^{-1}$) і тому розширення буде не врівноваженим. Але, й нагріватися перетворювач буде нерівномірно також в різних частинах, то різниці теплового розширення буде невеликою за такої умови. Але треба мати на увазі, що при рівномірному тепловому полі перетворювача у всіх його компонентах (для великих робочих циклів), попереднє напруження п'єзокераміки за рахунок стягуючого болта може бути змінене.

Надмірне підвищення температури призводить до *незворотних наслідків*:

- деполяризація п'єзокераміки, при досягненні точки Кюрі, а також її термічне старіння та деградація (*деградація проявляється як зменшення* *електричного опору п'єзокераміки та п'єзоелектричних властивостей та збільшення струму витоку*) [20, 50]. Для PZT п'єзокераміки характерні швидке термічне старіння при температурі більше 200^0С, коли температура Кюрі 386^0С [15];

- зниження електричної міцності п'єзокераміки, через що може наступити тепловий електричний пробій [33];
- можливе механічне розтріскування зразків та плавлення, наприклад свинцю (зазначимо температуру плавлення свинцю - 327.5^0С), в перетворювачі [51].

Взагалі, керування п'єзоелектриками при високих рівнях потужності призводить до нелінійних та теплових ефектів, які потрібно розуміти для точного вимірювання та управління приладом. У режимі малого сигналу п'єзоелектрики зазвичай бувають лінійними, ізотермічними та адіабатними. Коли ті самі матеріали рухаються на більш високих рівнях збудження, теплові умови можуть значно змінитися, і зразок за цих умов вже не є ізотермічним або адіабатичним [51].

Виникнення дуги через коротке замикання. Якщо напруга, прикладена до керамічних кристалів, досить велика і / або дві провідні поверхні протилежної полярності знаходяться досить близько один до одного, може виникнути дуга, через коротке замикання. Ця дуга може викликати локальну деполяризацію через дуже високі температур і, таким чином, привести до руйнування кристала [52].

Для *підвищення ефективності перетворювача* в цілому варто зменшити нераціональні витрати енергії, які йдуть на нагрів. Якщо п'єзокераміка в процесі експлуатації досягає температури між 150°C і 180°C, ефективність перетворювача значно знизиться, за рахунок зміни властивостей п'єзокераміки. Наприклад, для п'єзокераміки PZT-8 (в якої температура Кюрі 300°C), рекомендована робоча температура 20°C - 60°C для всіх режимів роботи, але в будь-якому випадку не вище 90°C [18].

Зазначимо, що зменшуючи температуру нагріву перетворювача, неможливо збільшити коефіцієнт корисної дії (ККД) перетворювача. Бо ККД залежить, по-перше, від властивостей п'єзокераміки, по-друге, від конструкції самого перетворювача, а на ці фактори не вплинути без зміни початкового варіанту перетворювача. Але за рахунок зменшення температури розігріву, можливо збільшити вихідну потужність, за рахунок того, що перетворювач “витримує” більшу вхідну потужність.

Поділ на обмеження, зміну параметрів перетворювача та незворотні наслідки досить умовний, тому що зміна одного з параметрів компоненту системи дає збій і веде за собою інші наслідки.

Через специфічні властивості п'єзокераміки - низьку теплопровідність і високу теплоємність, і виникає така проблема перегріву з ультразвуковими п'єзокерамічними пристроями. Найчастіше потрібна велика кількість часу для достатнього самостійного охолодження п'єзокераміки. Особливо актуально вирішувати проблему нагріву перетворювачів для тих, що працюють в безперервному режимі або на великих потужностях, і для тих конструкцій, що мають невелику поверхневу площу.

1.5. Енергетичні втрати в п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачах

Енергетичні втрати в системі визначаються, як відсоток енергії, що подається в систему, яка не може бути перетворена в енергію [24].

В п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів виділяють 3 різновиди втрат. Загальні втрати - це сума електричних (тобто діелектричних і п'єзоелектричних), і механічних втрат [36]. Зазначимо, що описуючи поведінку п’єзокераміки (матеріалу) для знаходження сумарних втрат, неможливо враховувати поведінку всього перетворювача [51].

Вважається, що електричні та механічні втрати в сегнетоелектричній кераміці складаються з чотирьох частин: 1) рух доменної стінки; 2) основна ділянка решітки, яка також мусить бути в бездоменних монокристалах; 3) внесок мікроструктури, який зазвичай зустрічається в полікристалічних зразках; 4) електропровідність у високоомних зразках. Однак у типовому п’єзоелектричному керамічному зразку втрати через рух доменної стінки значно перевищують три інші внески [53].

Також існує розділення на зовнішні "extrinsic" та внутрішні "intrinsic, intensive" втрати [36]. Щоб зрозуміти різницю зовнішніх та внутрішніх втрат в [53] пропонують уявити зразок матеріалу певного об'єму, потім поділити його навпіл. Внутрішній параметр (внутрішній параметр матеріалу, такий як зміщення/деформація *x* та загальний дипольний момент/електричне зміщення *D*) залежить від об'єму матеріалу, тобто він стає в половину меншим. Тоді як зовнішній параметр (параметр, що контролюється зовні, наприклад, сила/напруження X та електричне поле E) не залежать від об'єму матеріалу.

Втрати в п'єзокераміці описуються гістерезисом. Гістерезис – запізнення зміни фізичної величини (що характеризують стан речовини) від зміни іншої фізичної величини, що характеризує зовнішні умови.

Втрати в п'єзокераміці [54]:

Механічні втрати (пружні) в п'єзокераміці – спричинені внутрішнім еластичним гістерезисом між напругою T та деформацією S. Між прикладеною напругою та виникаючою деформацією є фазовий зсув σ. Тоді tgσ – міра відносної втрати механічної енергії за один цикл, називається - коефіцієнт пружних втрат. Механічна добротність обернено пропорційна до коефіцієнту пружних втрат:

Механічна добротність: $Q_m = \dfrac{1}{tg\sigma}$.

Тобто висока механічна добротність означає низькі механічні втрати, та низьке тепловиділення.

Механічні втрати в перетворювачі виникають через деформації різних компонентів і тертя на межі розділу (на п'єзокерамічних поверхнях, різьбі болтів). Електричні втрати поділяються на діелектричні та п’єзоелектричні. Хоча в деяких випадках дозволено нехтувати п’єзоелектричними втратами, через їх незначний вплив на сумарні втрати потужностей.

Діелектричні втрати спричинені гістерезисом між електричним полем E та електричним переміщенням D. Характеризуються тангенсом кута діелектричних втрат tgδ= активна складова струму/реактивної складової струму, що течуть в п'єзокераміці. Тангенс кута діелектричних втрат коливається в межах tgδ=(0,001-0,06) в залежності від типу п'єзокераміки.

Діелектричні втрати в сильних електричних полях рівні площі петлі гістерезису, різкий ріст спостерігається в межах електромеханічного резонансу. При робочій частоті менше 1000 Гц змінами діелектричних втрат нехтують.

П'єзоелектричні втрати найбільш суперечливі, деякі автори вважають, що це особливість матеріалу, який реагує як на пружне, так і на електричне поле [24]. Вони спричинені електромеханічним гістерезисом між деформацією S та електричним полем E. Ці втрати можна розглядати як затримку між збуджуючим фактором та відгуком, або як результат перехресної взаємодії між двома формами енергії. Тобто, втрати на тертя в електричних полях та збільшення електричного опору при механічному напруженні. [24].

Залежність втрат від резонансу/не резонансу/антирезонансу. На резонансі нагрів більший, поза резонансом на виділення тепла діють тільки діелектричні втрати. Треба зауважити з приводу рівномірності нагріву й тепловиділення, а не тільки кількості. Виділення тепла відбувається у зразку рівномірно в режимі поза резонансом, головним чином за рахунок інтенсивних діелектричних втрат, тоді як тепло генерується переважно у вузлових точках вібрації через інтенсивні пружні втрати в режимі резонансу. В обох випадках збільшення втрат відбувається внаслідок значної зміни діелектричних втрат під впливом електричного поля [53]. Для прикладу, резонатори з низькою добротністю (тобто відбуваються високі механічні втрати) мають широкі піки резонансна та антирезонансна.

Електричні втрати можливо визначити двома методами. В першому випадку кожна пара п'єзокерамічних елементів збуджується так, що напруги зсуваються по фазі на 180 ° (тобто коли напруга на одній п'єзокераміка позитивна, напруга на сусідній п'єзокераміка негативна). Тоді кожна пара п'єзокераміки намагається одночасно розширюватися або стискатися. В іншому випадку два ідентичних перетворювачів кріпляться один до одного випромінюючими накладками і збуджуються одним джерелом живлення в фазі. У другому методі обидва датчика одночасно намагаються розширюватися або стискатися. Таким чином усуваються всі механічні (коливальні) втрати, залишаються тільки електричні втрати.

Визначити *механічні втрати* перетворювача можна застосувавши силові (навантажувальні) випробування (тобто експлуатуючи перетворювач під напругою). Методика силового випробування полягає в тому, щоб вимірювати температуру перетворювача, поступово збільшуючи навантаження (тобто потужність) і зменшувати робочий цикл (збільшувати час виключення) [55].

Енергетичні втрати важливі для визначення теплових полів, адже саме це значення впливає на величину максимальної температури. Вважаючи, що всі втрати в перетворювачі йдуть на нагрів, розв'язують рівняння для теплового поля.

1.6. Аналіз механізмів теплових процесів

Для того щоб розв'язати задачу теплових полів п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, розглянемо деякі аспекти теорії теплообміну.

Температурне поле визначається, як сукупність значень температури для усіх точок простору в даний момент часу. Температура характеризує тепловий стан тіла та визначає ступінь його нагрітості. Тепловий стан окремих частин тіла в процесі теплопровідності різний, тому температурне поле – функція координат та часу [56].

Потенціалом перенесення теплоти є різниця температур. У теорії теплообміну під процесом перенесення теплоти розуміється процес обміну внутрішньою енергією між тілами або елементами одного тіла у форматі теплоти. Теплообмін - складний процес, який можна поділити на більш прості способи. Теплота може передаватися трьома принципово відмінними один від одного способами: теплопровідністю, конвективним переносом і випромінюванням [57]. В задачі визначення теплового поля п'єзокерамічного електроакустичного перетворювача присутні теплопровідність та конвекційний теплообмін.

Явище *теплопровідності* (кондукції) полягає в перенесенні теплоти структурними частинками речовини (молекулами, атомами, електронами) в процесі їх теплового руху. Такий теплообмін може відбуватися в будь-яких тілах з неоднорідним розподілом температури (тобто коли є перепад температур в різних точках), але механізм перенесення теплоти залежить від агрегатного стану тіла. Тепловий потік за рахунок P_m теплопровідності від більш теплої області до більш холодної описується наступним виразом:

$$P_m = \frac{\lambda \cdot S \cdot (t_1 - t_2)}{d},$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності, що характеризує властивості матеріалу стінки, Вт/(м$\cdot$К); S - площа поширення теплового потоку по стінці, м^2; t_1, t_2 температури поверхонь стінки, К; d - товщина стінки, м.

Також тепловий потік через плоску теплопровідну стінку описують за допомогою методу електроаналогій, процес протікання моделюють наче протікання електричного току через резистор [58].

Конвективний теплообмін - це процес перенесення теплоти об'ємами (молями) рідини або газу, що переміщуються. Обсяги рідини або газу, переходячи з області з більшою температурою в область з меншою температурою, переносять з собою теплоту. Явище конвективного перенесення теплоти спостерігається лише в текучих середовищах (рідинах і газах) і може здійснюватися в результаті вільного або вимушеного руху.

Вільний рух (*вільна конвекція*) виникає тоді, коли частки рідини в різних ділянках системи знаходяться під впливом масових сил. У гравітаційному полі неоднорідність щільності, що виникає при нерівномірному нагріванні частин системи, викликає вільний рух.

Вимушений рух (*вимушена конвекція*) відбувається під дією зовнішніх поверхневих сил. Різниця тисків, під дією якої переміщується теплоносій, створюється за допомогою вентиляторів, насосів, ежекторів і інших пристроїв. Кількість теплоти , $P_к$ що віддається нагрітим тілом за рахунок конвекції, визначається за формулою:

$$P_к = a_к \cdot S \cdot \vartriangle t,$$

де $a_к$ - коефіцієнт теплообміну конвекцією, $\vartriangle t$ - перепад температур між ізотермічними поверхнями, S - площа поверхні теплообміну, м^2.

Фізичний механізм процесу теплопровідності залежить від фазового стану і структури речовини. У рідинах і твердих тілах (діелектриках) перенесення теплоти здійснюється безпосередньою передачею теплового руху молекул і атомів сусіднім частинкам речовини. Також теплота передається в основному теплопровідністю від стінки (або до неї) в дуже тонкому рухливому пристінному шарі газу (рідини).

В газоподібних тілах поширення теплоти теплопровідністю відбувається внаслідок обміну енергією при зіткненні молекул, що мають різну швидкість теплового руху. В металах теплопровідність здійснюється головним чином в результаті руху вільних електронів [57, 58].

Мірою виділення тепла є густина теплового потоку. Кількість теплоти, переданої в одиницю часу через довільну поверхню, називається *тепловим потоком* і позначається Q [Дж / с] або [Вт]. Тепловий потік, віднесений до одиниці площі поверхні, називається *густиною теплового потоку* (тепловим навантаженням) q, вимірюється в [Дж/с м^2 = Вт/м^2]. Розрізняють лінійну густину теплового потоку, поверхневу та об'ємну. Тепловий потік і густина теплового потоку є векторними величинами, тобто характеризуються напрямом і величиною (модулем вектора). Теплові потоки виникають в тілах і між тілами тільки при наявності різниці температур [56]. Густину теплового потоку знаходять через енергію втрат в перетворювачі, поділену на об'єм активного елементу. Приблизно оцінити втрати в перетворювачі можна за допомогою коефіцієнта корисної дії. Для стержневих перетворювачів цей коефіцієнт може бути 50-85% [59, 60], для циліндричних навіть менше.

Знаючи величину енергетичних втрат в перетворювачі, та закони теплообміну між елементами та зовнішнім середовищем, можна знайти його теплові поля. Між елементами перетворювача теплота переноситься завдяки теплопровідності, а у зовнішнє середовище передається конвекцією.

1.7. Методи визначення теплового поля конструкцій електроакустичних перетворювачів

Треба розрізняти методи визначення саме теплового поля та знаходження певних характеристик для розуміння теплових процесів. Такі як, наприклад, збільшення температури, потужність втрат, густину теплового потоку, чи навіть порівнюючи коефіцієнти теплопровідності, чи тепловіддачі в середовищі можна оцінити приблизні ефекти від теплового навантаження. Але коли необхідно оцінити всю теплову картину перетворювача, то необхідно розв'язувати задачу теплового поля. Перебіг теплового процесу в будь-якій точці твердого ізотропного тіла в будь-який момент часу при заданих граничних і початкових умовах описується диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є [61]. Тобто функцію для побудови теплового поля отримуються з розв'язання рівняння теплопровідності Фур'є.

Для математичного опису роботи п'єзокерамічного електроакустичного перетворювача використовують дві методики: методику зв'язаних полів (неперервна електромеханічна математична модель) та метод електромеханічних аналогій. Метод зв'язаних полів (continuum mathematical electro-mechanical model) - це чисто математичний підхід, в той час як метод еквівалентних схем – напів емпіричний метод [62].

Існують багато протиріч, що тільки метод зв'язаних полів може адекватно оцінити роботу п'єзокераміки. Але для приблизного підрахунку метод еквівалентних схем також має місце, так він швидко підходить для оцінки необхідних характеристик перетворювача. Оскільки він імітує систему з дискретними компонентами, то характеристики дійсні тільки для однієї резонансної частоти. Але для аналізу теплових полів, такий підхід підходить. Для ефективного конструювання перетворювачів необхідно оцінити резонансну частоту та густину теплового потоку, вважаючи, що усі втрати в перетворювачі йдуть на нагрів, то можливе спрощення до знаходження сумарних втрат в перетворювачі.

Будемо вважати, що, для оцінки густини теплового потоку в п’єзокераміці (адже саме п'єзокераміка в перетворювачі є активним елементом та тільки в ній виділяється тепло) підходить метод еквівалентних схем.

Наведемо приклади використання. У статті [21] розширюється використання методу еквівалентної схеми у вигляді орієнтира саме на визначення джерела тепла та розробили набір рівнянь, що дає більш точний засіб для оцінки втрати п'єзоелектричного матеріалу. Такий результат пропонують використовувати далі в програмах, що використовують метод скінченного елементу, така як ANSYS, або моделі схем для отримання підвищення температури в перетворювачі. Далі тут порівнювали результати запропонованого аналізу з експериментом і отримані дані майже співпадають.

В статті [32] пропонують також за допомогою формул отриманих методом еквівалентних схем порівняти температуру розігріву п'єзокерамічного хірургічного перетворювача з виміряною експериментально. Збільшення температури розраховують за формулою:

$$\vartriangle T = \frac{P \cdot \vartriangle t}{c_p},$$

де $\vartriangle t$ - зміна часу в с, c_p - теплоємність на одиницю маси в Дж/(К· кг), а P - потужність, що поглинається кожною частиною перетворювача. Ця потужність розраховується через напругу, вхідний електричний імпеданс перетворювача, та опори втрат: опір випромінювання в середовище, опір дисипації та опри п’єзокерамічних пластин та двох накладок. Теоретичні розрахунки з виміряними експериментально дуже добре узгоджені.

В [23] представлена модель еквівалентної схеми, враховуючи всі три різновиди втрат (механічні, діелектричні та п'єзоелектричні) в перетворювачі.

В роботі [62] було проведено детальне дослідження для виявлення похибки резонансної та антирезонансної частоти. Встановлено, що розрахунки резонансної частоти математичним методом через неперервну електромеханічну модель для перетворювача типу Ланжевена різняться з числовим вирішенням (так називають моделювання в програмі COMSOL) в 0.5%, так само як і з експериментом також різниця в 0.5%. Між моделюванням та експериментом похибка резонансної частоти в 1%.

Таким чином, результати отримані за допомогою методу еквівалентних схем повністю задовольняють опис поведінки перетворювачів для оцінки втрати потужностей і подальшого розрахунку теплового поля перетворювача.

Висновки до розділу 1

Для довготривалої та ефективної роботи електроакустичних перетворювачів їх конструкції повинні бути розраховані на роботу при зовнішніх навантаженнях. Особливо небезпечні теплові навантаження, вони можуть призвести до нестабільної роботи чи виходу з ладу ПЕП.

П'єзокерамічні електроакустичні перетворювачі (ПЕП) відносяться до тієї групи приладів, конструкції яких мають у своєму складі активні елементи, виконані з п'єзокераміки. Під час експлуатації, в режимі випромінювання звуку виділяється теплова енергія, що призводить до нагрівання всієї конструкції перетворювача. Тому однією з важливих задач, які потрібно вирішувати при конструюванні таких перетворювачів, є визначення температури розігріву їх конструкцій. Знаючи, до якої температури та за який час розігрівається конструкція ПЕП можливо передбачити негативні наслідки від теплових навантажень.

До виділення тепла призводить енергетичні втрати в п'єзокераміці та всьому перетворювачі. Причини виникнення нагріву ПЕП: внутрішні механічні втрати в п’єзокераміці (втрати на тертя); діелектричне розсіювання (дисипація) затухання в п'єзокераміці; низька електрична проводимість електродів; нагрівання п'єзокераміки через протікання через неї змінного електричного струму; перенесення тепла від пасивної накладки та робочого інструменту і нагрівання робочого середовища; клейове з'єднання.

Нагрів перетворювача призводить до зміни характеристик приладу, або виходу з ладу. Якщо неможливо зменшити виділення тепла і подальший нагрів перетворювача, то його зазвичай обмежують у режимах використання. Збільшення температури призовдить до: нелінійних реакцій і зміни робочої частоти, зміни електричного опору приладу, порушення умов узгодження з електронним генератором, деполяризації та деградації, зниження електричної міцності п'єзокераміки, механічне пошкодження елементів ПЕП.

Енергетичні втрати в перетворювачі – це сума мехінічних та електричних втрат. Вважають, що всі втрати енергії в ПЕП переходять в виділення тепла. Густина теплового потоку – це як раз величини енергії, що характеризує тепловиділення в системі. Теплові поля перетворювачів вивчають за допомогою диференційного рівняння теплопровідності Фур'є.

Таким чином, проблема нагріву потужних перетворювачів залишається недостатньо вивченою і необхідно дослідити методи зменшення максимальної температури розігріву перетворювача. Доступні методики визначення теплового поля на етапі конструкторських робіт мало досліджені.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ КОНСТРУКЦІЙ П’ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1. Визначення теплового поля

В першому розділі згадувалось про те, що за теплові поля "відповідає" диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є.

Основним законом теплопровідності є запропонована Жаном Батіста Жозефом Фур'є гіпотеза про пропорційності теплового потоку температурному градієнту. Вивчаючи процес теплопровідності в твердих тілах, Фур'є експериментально встановив, що кількість переданої теплоти пропорційно падінню температури, часу і площі перетину, перпендикулярного напрямку поширення теплоти.

Відповідно до гіпотези Фур'є кількість теплоти dQ (тепловий потік), яке пройде через площу ізотермічної поверхні dF за елемент часу , $d\tau$ запишеться виразом [63]:

$$d^2Q = -\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)dF \cdot d\tau, \tag{2.1}$$

де λ- коефіцієнт теплопровідності, він є фізичною характеристикою речовини. Чим більше числове значення, тим вище здатність речовини проводити теплоту. Величина коефіцієнта теплопровідності залежить від природи речовини, його структури, температури і інших чинників.

А $\frac{\partial t}{\partial n}$ - градієнт температури, це вектор, що направлені по нормалі до ізотермічної поверхні в бік збільшення температури. Він характеризує максимальну швидкість зміни температури по направленню. Вектор градієнта температур розкладається в проекції осі координат.

Знак мінус вводиться тому, що вектор градієнта температур (права сторона рівняння) направлений в сторону збільшення температури, а вектор теплового потоку - в протилежну сторону (у бік зменшення температури).

Поділивши обидві частини виразу (2.1) на $dF \cdot d\tau$, можна отримати вираз для густини теплового потоку:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}. \tag{2.2}$$

На основі закону збереження енергії (баланс теплоти) вченими було отримано рівняння теплопровідності (вивід формул описано [56, 63]):

$$\lambda_T \nabla^2 T + q_v = C_T \rho \frac{dT}{dt}, \tag{2.3}$$

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.

У випадку стаціонарного температурного поля, права частина рівняння (2.3) дорівнює нулю:

$$\lambda_T \nabla^2 T + q_v = 0, \tag{2.4}$$

Диференціальне рівняння теплопровідності в загальному вигляді для стаціонарного процесу запишемо в наступному вигляді, розділивши рівняння (2.4) на коефіцієнт теплопровідності:

$$\nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda_T} = 0, \tag{2.5}$$

де q_v/λ_T – характеризує виділення тепла.

Отримане рівняння характеризує теплове поле в окремому зразку матеріалу, різні зразки поєднуються між собою і характеризуються умовами однозначності. Рівняння теплопровідності можна застосовувати для плоских, циліндричних, шарових стінок та неправильної форми при вирішенні одно-, дво, трьох-вимірної задачі.

Умови однозначності для теплових процесів

Рівняння теплопровідності працює в загальному випадку, для будь-якого прикладу. Для того щоб виділити необхідний процес теплопровідності, який треба дослідити, то треба його записати окремими чіткими умовами. Ці умови однозначності, дозволяють виділити та виповнити інтегрування рівняння енергії.

У загальному випадку *умови однозначності* мають містити:

1) геометричні умови - форма і розміри тіла;

2) фізичні умови - фізичні властивості тіла і навколишнього середовища;

3) часові умови - визначають початкове тепловий стан системи і зміна граничних умов в часі (задаються тільки при нестаціонарному режимі теплопровідності);

4) граничні умови - визначають особливості взаємодії розглянутого тіла з навколишнім середовищем.

Граничні умови для процесів теплопровідності задаються в трьох варіантах.

1. Граничні умови першого роду. Задається розподіл температур на границях тіла в кожен момент часу.

2. Граничні умови другого роду. Задаються показник теплового потоку на кордонах тіла в кожен момент часу і одна температура.

3. Граничні умови третього роду. Задаються температура навколишнього середовища і закон теплообміну між тілом і навколишнім середовищем (коефіцієнти теплообміну).

Диференціальне рівняння енергії і умови однозначності є повною математичної формулюванням (математичною моделлю) конкретної задачі теплопровідності [57].

В підрозділі 1.7. Методи визначення теплового поля конструкцій електроакустичних перетворювачів були розглянуті варіанти вирішення задачі теплового поля і температури нагріву ПЕП. Але для стержневого перетворювача не вирішеною є задача аналітичного розрахунку теплового поля. А для перетворювачів циліндричної конструкції, аналітичний розрахунок потребує уточнення. Далі пропонується вирішувати задачу знаходження теплових полів на основі розв’язування диференціального рівняння теплопровідності Фур'є для кожного шару (тобто елементу) конструкцій.

2.2. Постановка задачі для стержневого перетворювача, умови однозначності

Типовий стержневий перетворювач працюючий на випромінювання (або його називають перетворювач типу Ланжевен, для гідроакустики така конструкція застосовується в перетворювачах типу Тонпілз) складається з коливальної системи в корпусі або без нього. Коливальна система складається з випромінюючої накладки, п'єзокерамічного активного елементу і тильної накладки. Механічний резонанс коливальні системи визначає робочу частоту випромінювання перетворювача. З'єднання елементів коливальної системи здійснюється за допомогою болтової стяжки (армуючий/стягуючий елемент), яка також створює попередні статичні напруження в коливальній системі, тим самим підвищуючи її механічну міцність. Електричне з'єднання п’єзоелемента проводиться проводами, а зовнішнє підключення перетворювача - електричним кабелем.

На прикладі конструкції конкретного перетворювача розглянемо використання запропонованної методики. Наступні параметри є найбільш характерними для такого типу перетворювачів, але не відносяться до конкретного виробу.

Умови однозначності для стержневого перетворювача:

1) геометричні умови - форма і розміри тіла;

Спрощена конструкція складається з двох накладок: тильної та випромінюючої та активного елементу. Тильна накладка у формі циліндру з отвором для стягуючого болта зовнішнім діаметром 50 мм, внутрішній 17 мм. Активний елемент – 4 кільця товщиною 10 мм, та зовнішнім діаметром 38 мм, внутрішній 17 мм. Випромінююча накладка у формі зрізаного конуса з вирізом для вкручування болта на 12 мм, діаметр основи конуса 60 мм, верхньої частини 38 мм, товщина 30 мм.

2) фізичні умови - фізичні властивості тіла і навколишнього середовища;

Навколишнє середовище – повітря, температура 25^0С.

Матеріал тильної накладки – сталь AISI 1020, густина 7900 кг/м^3, коефіцієнт теплопровідності 47 Вт/(м·К), модуль пружності $20 \cdot 10^{10}$ Н/м^2.

Матеріал активного елементу – п'єзокераміка APC 840, густина 7600 кг/м^3, коефіцієнт теплопровідності (в межах температури [18 - 100] °C) 1.9 Вт/(м·К), модуль пружності на розтягування та стиснення по товщині 6.8 10^{10} Н/м^2.

Матеріал випромінюючої накладки – алюміній Alloy 1060, густина 2700 кг/м^3, коефіцієнт теплопровідності 200 Вт/(м·К), модуль пружності $6.9 \cdot 10^{10}$ Н/м^2.

3) часові умови - визначають початковий тепловий стан системи і зміну граничних умов в часі (задаються тільки при нестаціонарному режимі теплопровідності);

Аналізується усталений стаціонарний тепловий режим.

4) граничні умови - визначають особливості взаємодії розглянутого тіла з навколишнім середовищем

Коефіцієнт тепловіддачі металевої стінки в спокійне повітря становить $\alpha_1 = \alpha_3 = 5.6$ Вт/(м^2·К).

Задаються три різновиди граничних умов: Рівність температури в точках контакту шарів (температура на межі контактів компонентів перетворювача і температура на поверхні накладок, контактуючі з зовнішнім середовищем); Рівність теплового потоку на границях накладок з оточуючуючим середовищем; Рівність теплового потоку на границях шарів. Тепловий потік поширюється з активного елементу , тобто умовно з середини перетворювача, в обидві накладки. Тепловий потік - векторна величина, і направлена в бік зменшення температури.

2.3. Методика знаходження теплового поля конструкцій ПЕП стержневого типу

Поєднання рівняння теплопровідності з реальним перетворювачем виглядає наступним чином. Методика полягає в тому, щоб спочатку спростити перетворювач до найважливіших для теплового поля компонентів і після цього застосувати спрощення цих компонентів до нескінченних по висоті шарів. Для кожного з шарів розв'язати рівняння теплопровідності. А для знаходження невідомих констант, що залишились після інтегрування, необхідно використати граничні умови. Подальша методика розв’язання задачі знаходження теплового поля стержневого перетворювача опублікована в [3, 64].

Стержневий перетворювач (типу Ланжевен) стратифікується до трьох шарів (рис. 2.1)

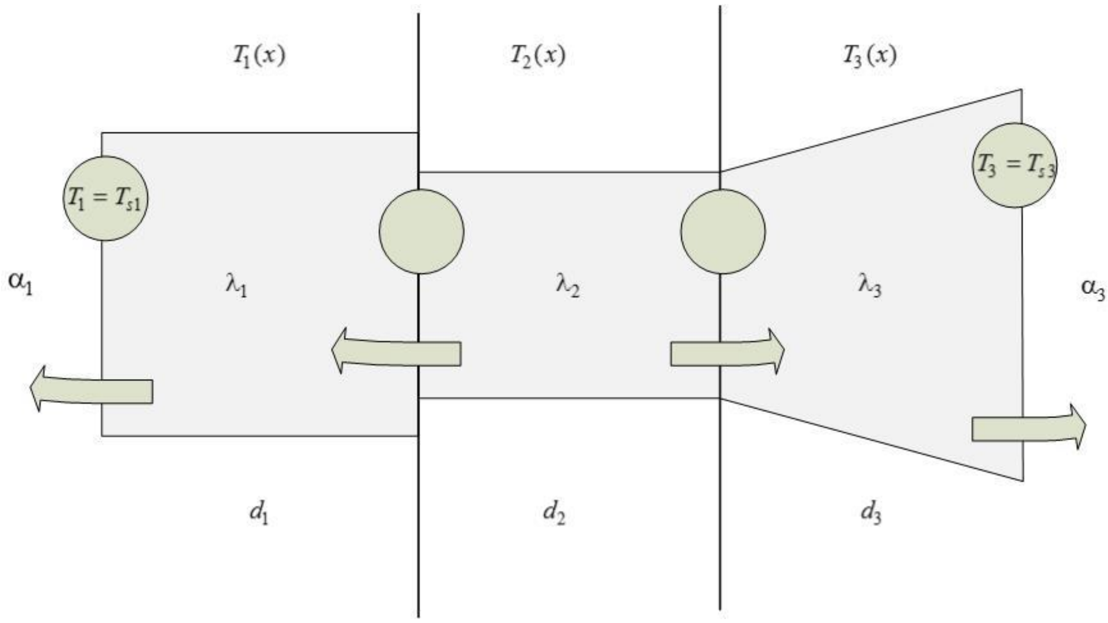


Рис.2.1 Стратифікація моделі стержневого перетворювача

На рисунку кружечками позначено граничні умови рівності температур, а стрілками – граничні умови рівності теплових потоків. $T_i(x)$- рівняння для визначення температури в i – ому шарі. λ_i, α_i, d_i- коефіцієнти теплопровідності та тепловіддачі відповідного шару, та товщина шару.

Використаємо теорему Ньютона – Лейбніца для границь шарів. Рівняння теплопровідності (2.5) для кожного шару та його розв'язок у загальному вигляді:

- для пасивного шару 1 – тильна накладка:

$$0 < x \le d_1$$

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

$$T_1(x) = xC_1 + C_2;$$

- для тепловиділяючого шару 2 – активний елемент:

$$d_1 < x \le d_1 + d_2$$

$$\frac{d^2T_2(\mathrm{x})}{dx^2}+\frac{q_v}{\lambda_2}=0,$$

$$\frac{d^2T_2(\mathrm{x})}{dx^2}=-\frac{q_v}{\lambda_2}$$

$$\int\limits_{d1}^{x}\frac{d^2T_2(\mathrm{x})}{dx^2}dx=-\frac{q_v}{\lambda_2}\int\limits_{d1}^{x}dx,$$

$$\frac{dT_2(x)}{dx}=-\frac{q_v}{\lambda_2}\cdot(x-d_1)+C_3,$$

$$\int\limits_{d1}^{x}\frac{dT_2(x)}{dx}dx=\int\limits_{d1}^{x}\left(-\frac{q_v}{\lambda_2}\cdot(x-d_1)+C_3\right)dx,$$

$$T_2(x)=-\frac{q_v}{2\lambda_2}(x-d_1)^2+C_3(x-d_1)+C_4;$$

- для пасивного шару 3 – випромінююча накладка:

$$d_1+d_2<x\le d_1+d_2+d_3$$

$$\frac{d^2T_3(x)}{dx^2}=0,$$

.

$$T_3(x)=C_5(x-(d_1+d_2))+C_6$$

Для знаходження невідомих констант $C_1..C_6$, необхідно використати граничні умови.

- Рівність температури в точках контакту шарів:

$$T_{1|x=0}=T_{s1},$$

$$T_{1|x=d1}=T_{2|x=d1},$$

$$T_{2|x=d1+d2}=T_{3|x=d1+d2},$$

$$T_{3|x=d1+d2+d3}=T_{s3},$$

де T_{s1} – температура поверхні випромінюючої накладки, T_{s3} – температура поверхні тильної накладки.

- Рівність теплового потоку на границях тіла з оточуючим середовищем:

$$\lambda_1\frac{\partial T_1(x)}{\partial x}=\alpha_1\left(T_{s1}-T_c\right)_{|x=0},$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(x)}{\partial x} = \alpha_3 \left(T_{s3} - T_c\right)_{|x=d1+d2+d3}.$$

- Рівність теплового потоку на границях шарів:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_{|x=d1}} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x)}{\partial x_{|x=d1}},$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x)}{\partial x_{|x=d1+d2}} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(x)}{\partial x_{|x=d1+d2}}.$$

Ці граничні умови представлені для заміни перетворювача на три шари. Шари замінюють найбільш важливі конструкційні елементи перетворювача, тому доводиться ігнорувати армуючий елемент і корпус, а також тепловий опір між шарами. Перетворювач вважається новим і контакт між шарами щільний.

Співвідношення для знаходження невідомих констант і температур поверхонь накладок і отримані підстановкою загальних розв'язків рівнянь теплопровідності в граничні умови і мають наступний вигляд.

Використаємо першу групу граничних умов:

$$T_1(\mathrm{x}=0) = \mathrm{T}_{s1},$$
$$C_2 = \mathrm{T}_{s1},$$

$$T_3(\mathrm{x}=d_1+d_2+d_3) = \mathrm{T}_{s3},$$
$$d_3 \cdot C_5 + C_6 = \mathrm{T}_{s3},$$

$$T_1(\mathrm{x}=d_1) = \mathrm{T}_2(\mathrm{x}=d_1),$$
$$d_1 \cdot C_1 + C_2 = C_4,$$

$$T_2(\mathrm{x}=d_1+d_2) = \mathrm{T}_3(\mathrm{x}=d_1+d_2),$$
$$-\frac{q_v}{2\lambda_2} d_2{}^2 + C_3 \cdot d_2 + C_4 = C_6.$$

Використаємо другу групу граничних умов:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\mathrm{x}=0)}{\partial x} = \alpha_1 (\mathrm{T}_{s1} - \mathrm{T}_c),$$
$$\lambda_1 \cdot C_1 = \alpha_1 (\mathrm{T}_{s1} - \mathrm{T}_c),$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(\mathrm{x}=d_1+d_2+d_3)}{\partial x} = \alpha_3 (\mathrm{T}_{s3} - \mathrm{T}_c),$$
$$-\lambda_3 \cdot C_5 = \alpha_3 (\mathrm{T}_{s3} - \mathrm{T}_c).$$

Використаємо третю групу граничних умов:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\mathrm{x}=d_1)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(\mathrm{x}=d_{12})}{\partial x},$$

$$\lambda_1 C_1 = \lambda_2 C_3,$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(\mathrm{x}=d_1+d_2)}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(\mathrm{x}=d_1+d_2)}{\partial x},$$

$$\lambda_2 \left(\frac{-q_v}{\lambda_2} d_2 + C_3 \right) = \lambda_3 C_5.$$

Зробивши ряд перетворень, отримаємо розв'язок невідомих констант та температури:

$$T_{s1} = T_c + q_v \cdot d_2 \cdot \frac{B}{A}, \text{ де}$$

$$A = \left[1 + \alpha_1 \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_3} \right) \right],$$

$$,$$

$$B = \left[\frac{1}{\alpha_3} + \frac{d_2}{2\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right]$$

$$T_{s3} = -\frac{\alpha_1}{\alpha_3} T_{s1} + T_c \left[\frac{\alpha_1}{\alpha_3} + 1 \right] + \frac{d_2}{\alpha_3} q_v,$$

$$C_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda_1} \left(T_{s1} - T_c \right),$$

$$C_2 = T_{s1},$$

$$C_3 = \frac{\alpha_1}{\lambda_2} \left(T_{s1} - T_c \right),$$

$$C_4 = d_1 \cdot C_1 + C_2,$$

$$C_5 = \frac{\alpha_3 \left(-T_{s3} + T_c \right)}{\lambda_3},$$

$$C_6 = -\frac{q_v}{2\lambda_2} \left(d_2 \right)^2 + C_3 \cdot d_2 + C_4.$$

Результати:

Для трьох шарів різних матеріалів, що імітують стержневий трьохкомпонентний перетворювач, було побудоване температурне поле на основі розв'язоку диференційного рівняння теплопровідності для кожного з шарів. Потужність втрат 15 Вт.

Отримані результати температурного поля для наступних випадків. Як вже згадувалось раніше, розрізняють об’ємну та поверхневу густину теплового потоку. В джерелах [61] використовують об’ємну густину теплового потоку і об’ємну густину теплового потоку домножену на коефіцієнт 0.24, походження якого не пояснюють, в цьому випадку $q = 43 \cdot 10^3 Вт / м^3$, і максимальна температура на активному елементі 120 ^{0}С. При об’ємній густині теплового потоку $q = 108 \cdot 10^3 Вт / м^3$, тоді максимальна температура активного елементу становить більше 400 ^{0}С, але ці рекомендаці діють на циліндричний перетворювач. В випадку заміни стержньового перетворювача відношення бічної площі поверхні, що контактує з наступним шаром, до товщини шару не буде таким великим. Для того щоб використовувати шарову модель для стержневого перетворювача, слід використовувати поверхневу густину теплового потоку $q = 43 \cdot 10^3 Вт / м^2$, беручи до розрахунку площу поперечного перерізу елементу, що випромінює тепло, $S_{поп.перерізу} = 0.34 \cdot 10^{-3} м^2$. В такому випадку $T_{s1} = 179,6$ ^{0}С, $T_{s2} = 180$ ^{0}С.

Графік теплового поля стержневого перетворювача, що працює в повітрі показано на рисунку, по осі абсцис – довжина перетворювача, по осі ординат – температура в ^{0}С:

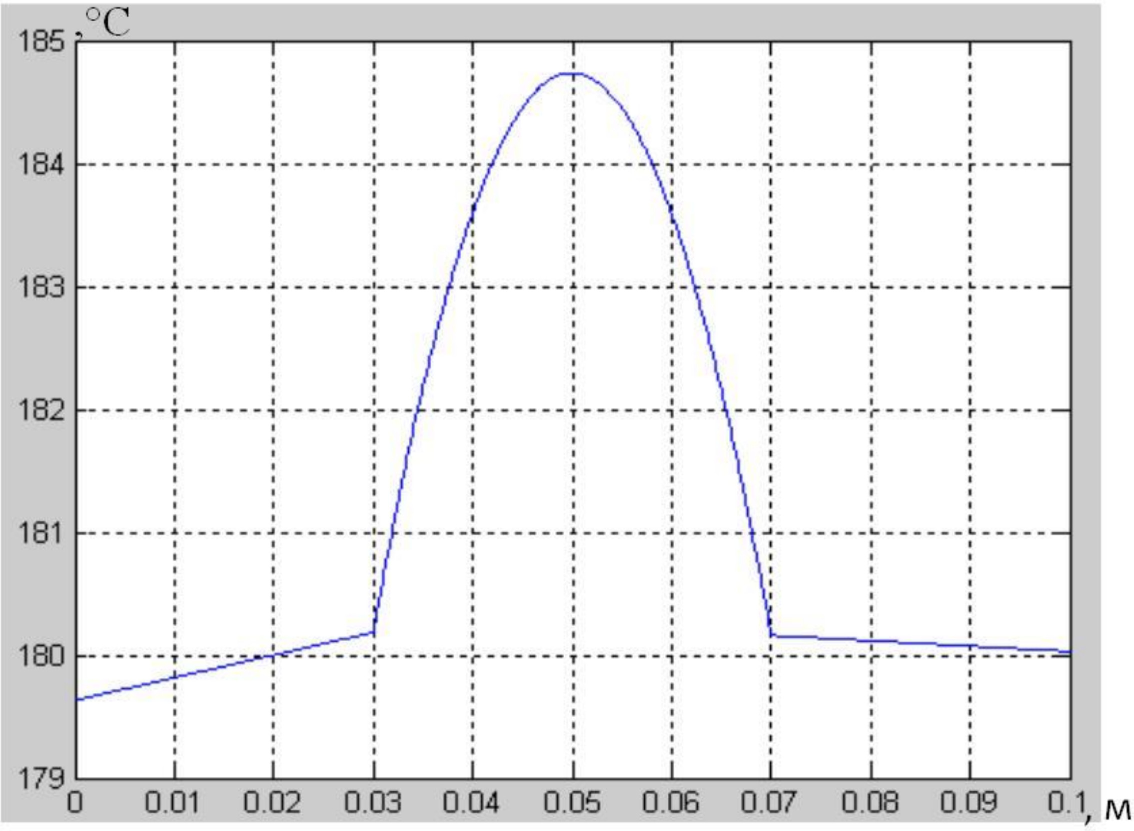


Рис.2.2 Теплове поле стержневого перетворювача

С графіка на рисунку 2.2 та рівнянь бачимо нелінійну залежність на відрізку, що відповідає п'єзокераміці, де відбувається нагрів й розподіляється в обидві боки. На відрізку металевих накладок залежність температури від координати – лінійна. Зазначимо, що коефіцієнт теплопровідності алюмінію майже в 4 рази більший за теплопровідність сталі, а температура накладок відрізняється на 0.4 ^{0}С.

Стержневі перетворювачі такої конструкції досить часто використовують для випромінення в рідину. Змінюючи коефіцієнт тепловіддачі металевої стінки на $\alpha_2 = 350$ Вт/(м^2 ·К), значення для металева поверхня – спокійна рідина, були отримані температури $T_{s1} = 45\,^0$С, $T_{s2} = 30\,^0$С, максимальна температура на активному елементі 46 ^{0}С.

2.4. Постановка задачі для циліндричного перетворювача, умови однозначності

Одним із можливих варіантів компенсації дії зовнішнього гідростатичного тиску є конструкція, заповнена електроізоляційною рідиною (наприклад трансформаторним маслом), герметизована металевими оболонками. Ця компенсована конструкція містить: активний елемент, кріплення, корпус, електроізоляцію, елемент армування, струмовід. Герметизація активного елемента може бути виконана полімерно-металевими або рідинно-металевими оболонками. Армований активний елемент розміщується в звукопрозорому корпусі, заповненому електроізоляційною рідиною. Активний елемент прикріплюють до корпусу за допомогою гумових деталей. З’єднання перетворювача з екраном і поверхнею антени здійснюється за допомогою спеціальної несучої конструкції. Перевагами рідинно-заповненої конструкції є її висока електрична міцність, ремонтопридатність та незалежність параметрів від гідростатичного тиску. До недоліків слід віднести складність виготовлення і знижений ККД, що обумовлено додатковими механічними втратами в електроізоляційній рідині.

Для подальшої стратифікації моделі, спростимо конструкцію, до найбільш значимих компонентів для теплового навантаження. Спрощену конструкцію компенсованого циліндричного перетворювача, заповненого рідиною зображено на рис.2.3 Його конструкція містить активний елемент 3, який знаходиться в металевому звукопрозорому корпусі (1 та 5 – відповідно зовнішня та внутрішня металеві оболонки корпуса). Зовні між п'єзоелементом та металевою оболонкою знаходиться шар полімерного матеріалу 2, який виконує роль електроізоляції. Зсередини між корпусом та активним елементом конструкція заповнена шаром електроізоляційної рідини 4.

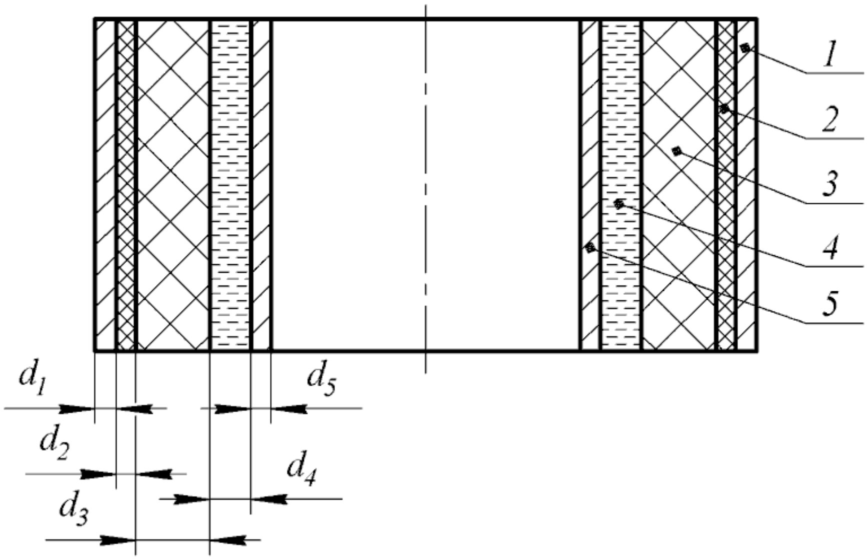


Рис.2.3. Схематичне зображення спрощеного циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції

Якщо відношення радіусів зовнішньої і внутрішньої циліндричних поверхонь ≤ 1.4, то з похибкою, меншою за 10 %, теплове поле нескінченного циліндра еквівалентне полю пластини [56]. Оскільки наведена умова для конструкцій циліндричних перетворювачів виконується завжди, то за розрахункову модель теплового поля такого ПЕП можливо прийняти теплове поле нескінченної пластини з тими ж граничними умовами та визначальними розмірами.

На прикладі конструкції конкретного перетворювача розглянемо використання запропонованної методики. Наступні параметри є найбільш характерними для такого типу перетворювачів, але не відносяться до конкретного виробу.

Умови однозначності для циліндричного перетворювача:

1) геометричні умови - форма і розміри тіла;

Внутрішній радіус циліндричного перетворювача 70 мм, внутрішній та зовнішній шар корпуса $d_1 = d_5 = 1{,}5$ мм, електроізоляційний шар товщиною $d_2 = 1$ мм, компенсуючий шар рідини товщиною $d_4 = 3$ мм, та активний елемент товщиною $d_3 = 8$ мм.

2) фізичні умови - фізичні властивості тіла і навколишнього середовища;

– шар 1 – титан ВТ1-0, $\lambda_{T1} = 16$ Вт/(м·К);

– шар 2 – матеріал АГ-4С, , $\lambda_{T2} = 0{,}315$ Вт/(м·К);

– шар 3 – п'єзокераміка АРС-840, мм, $\lambda_{T3} = 1{,}9$ Вт/(м·К), густина теплового потоку $q_{V3} = 330 \cdot 10^3$ Вт/м^3;

– шар 4 – трансформаторне масло ТКп, , $\lambda_{T4} = 0{,}11$ Вт/(м·К);

– шар 5 – титан ВТ1-0, $\lambda_{T4} = 0{,}11$ Вт/(м·К);

Перетворювач працює повністю занурений у воду, температура навколишнього середовища 20°С.

3) Часові умови - визначають початковий тепловий стан системи і зміну граничних умов в часі (задаються тільки при нестаціонарному режимі теплопровідності);

Аналізується усталений стаціонарний тепловий режим.

4) Граничні умови - визначають особливості взаємодії розглянутого тіла з навколишнім середовищем

Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої та внутрішньої поверхонь $\alpha_{T1} = \alpha_{T5} = 350$ Вт/(м^2·К) (взяте середнє значення для тепловіддачі метал – спокійна вода

Задаються три різновиди граничних умов: Рівність температури в точках контакту шарів (температура на межі контактів компонентів перетворювача і температура на поверхні корпуса, що контактує з зовнішнім середовищем); Рівність теплового потоку на границях шарів з оточуючим середовищем; Рівність теплового потоку на границях шарів. Тепловий потік поширюється з активного елементу, тобто з середнього шару перетворювача, в обидві напрямки.

2.5. Методика знаходження теплового поля конструкцій циліндричного типу

В роботі [65] опубліковано розрахунок теплових полів герметизованих циліндричних п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів компенсованої конструкції. Така конструкція має 5 шарів матеріалу, один з яких активний шар п’єзокераміки розташовано між полімерним електроізоляційним матеріалом й металевим корпусом. Циліндричний перетворювач герметизований металополімерними шарами має теплове поле симетричне відносно активного елементу. Задача теплового поля розв'язується за допомогою трьох рівнянь теплопровідності для кожного з шарів конструкції та семи граничних умов: рівність теплових потоків на границях шарів та на границі з середовищем, рівність температур в точках контакту шарів та на поверхні перетворювача, та умова симетрії теплового поля відносно середини п'єзокераміки. В [61] така задача розв'язувалась заміною двох пасивних шарів без тепловиділення на один з спільним тепловим опором, тим самим спрощуючи конструкція до трьох шарів симетричних відносно п'єзокераміки. Така методика не дозволяє отримати розподіл температури в усіх шарах матеріалу. В [65] представлено графік розподілу теплового поля симетричної конструкції для 5 шарів матеріалів, що дозволяє побачити значний перепад температури в полімерному шарі.

Для розрахунку теплового поля несиметричної конструкції герметизованого циліндричного перетворювача з рідинним заповненням необхідно розв'язати 5 рівнянь теплопровідності для кожного з шарів. Адже на відміну від попередніх робіт в наступній конструкції електроізоляційні шари не однакові (шар електроізоляційного матеріалу і рідини, що виступає також в ролі компенсуючого шару) мають різну товщину і коефіцієнт теплопровідності. Наступні викладки розв'язку задачі теплового поля і результат на графіку теплового поля циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції опубліковані в [66].

Для розв'язання задачі теплопровідності шарів плоских стінок - розіб'ємо модель циліндричного перетворювача на шари. 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. 2.4). 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 металу 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 характеризується величиною об'ємної потужності джерел q_{V3}.

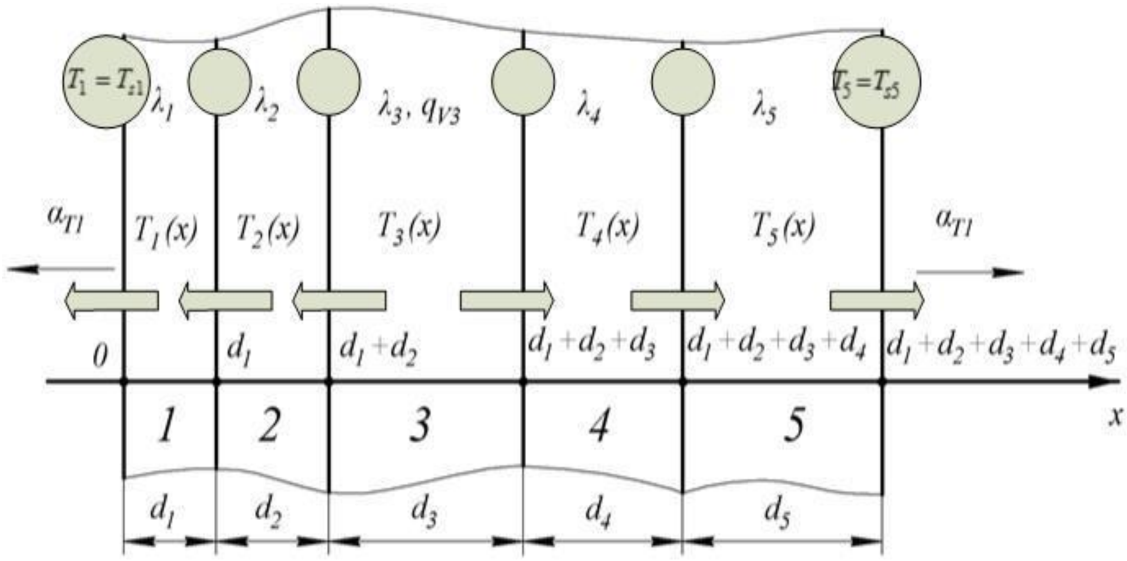


Рис.2.4. Стратифікована модель циліндричного перетворювача

Розв'яжемо рівняння теплопровідності для кожного шару для наступних інтервалів товщини шарів циліндричного перетворювача.

Для шару 1:

$$0 < x \le d_1;$$

$$T_1(x) = C_1 x + C_2;$$

Для шару 2:

$$d_1 < x \le d_1 + d_2;$$

$$T_2(x) = C_3\left(x - d_1\right) + C_4;$$

Для шару 3:

$$d_1 + d_2 < x \le d_1 + d_2 + d_3;$$

$$T_3(x) = -\frac{q_{V3}}{2\lambda_{T3}}\left(x - \left(d_1 + d_2\right)\right)^2 + C_5\left(x - \left(d_1 + d_2\right)\right) + C_6;$$

Для шару 4:

$$d_1 + d_2 + d_3 < x \le d_1 + d_2 + d_3 + d_4;$$

$$T_4(x) = C_7\left(x - \left(d_1 + d_2 + d_3\right)\right) + C_8,$$

Для шару 5:

$d_1 + d_2 + d_3 + d_4 < x \le d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5$;

$T_5(x) = C_9\left(x - \left(d_1 + d_2 + d_3 + d_4\right)\right) + C_{10}$,

Для знаходження невідомих констант $C_1..C_{10}$, необхідно використати граничні умови.

1) Рівність температури в точках контакту шарів:

$$T_1(x)\big|_{x=d_1} = T_2(x)\big|_{x=d_1};$$

$$T_2(x)\big|_{x=d_1+d_2} = T_3(x)\big|_{x=d_1+d_2};$$

$$T_3(x)\big|_{x=d_1+d_2+d_3} = T_4(x)\big|_{x=d_1+d_2+d_3};$$

$$T_4(x)\big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4} = T_5(x)\big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4}$$

$$T_1(x)\big|_{x=0} = T_{S1};$$

$$T_5(x)\big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4+d_5} = T_{S5}.$$

2) Рівність теплового потоку на границях шарів з оточуючим середовищем;

$$\lambda_{T1}\frac{dT_1(x)}{dx}\Big|_{x=0} = \alpha_{T1}\left(T_{S1} - T_c\right);$$

$$-\lambda_{T5}\frac{dT_5(x)}{dx}\Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4+d_5} = \alpha_{T5}\left(T_{S5} - T_c\right);$$

3) Рівність теплового потоку на границях шарів.

$$\lambda_{T1}\frac{dT_1(x)}{dx}\Big|_{x=d_1} = \lambda_{T2}\frac{dT_2(x)}{dx}\Big|_{x=d_1};$$

$$\lambda_{T2}\frac{dT_2(x)}{dx}\Big|_{x=d_1+d_2} = \lambda_{T3}\frac{dT_3(x)}{dx}\Big|_{x=d_1+d_2};$$

$$\lambda_{T3}\frac{dT_3(x)}{dx}\Big|_{x=d_1+d_2+d_3} = \lambda_{T4}\frac{dT_4(x)}{dx}\Big|_{x=d_1+d_2+d_3};$$

$$\lambda_{T4}\frac{dT_4(x)}{dx}\Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4} = \lambda_{T5}\frac{dT_5(x)}{dx}\Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4}$$

Підставивши вирази для рівняння кожного з шарів у граничні умови, та зробивши ряд перетворень, одержимо:

$$T_{S1}=\frac{q_{V3}\left(\frac{d_3^2}{2\lambda_{T3}}+\frac{d_3 d_4}{\lambda_{T4}}+\frac{d_3 d_5}{\lambda_{T5}}+\frac{d_3}{\alpha_{T5}}\right)}{\alpha_{T1}\left(\frac{d_1}{\lambda_{T1}}+\frac{d_2}{\lambda_{T2}}+\frac{d_3}{\lambda_{T3}}+\frac{d_4}{\lambda_{T4}}+\frac{d_5}{\lambda_{T5}}+\frac{1}{\alpha_{T4}}\right)+1}+T_c;$$

$$C_1=\frac{\alpha_{T1}}{\lambda_{T1}}\left(T_{S1}-T_c\right);$$

$$C_2=T_{S1};$$

$$C_3=C_1\frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T2}};$$

$$C_4=C_1 d_1+C_2;$$

$$C_5=C_1\frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T3}};$$

$$C_6=C_3 d_2+C_4;$$

$$C_7=-\frac{d_3 q_{V3}}{\lambda_{T4}}+C_1\frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T4}};$$

$$C_8=-\frac{d_3^2 q_{V3}}{2\lambda_{T3}}+C_5 d_3+C_6;$$

$$C_9=-\frac{d_3 q_{V3}}{\lambda_{T5}}+C_1\frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T5}};$$

$$C_{10}=C_7 d_4+C_8;$$

$$T_{S5}=C_9 d_5+C_{10}.$$

У результаті підстановки чисельних виразів, побудуємо графік теплового поля у циліндричному перетворювачі:

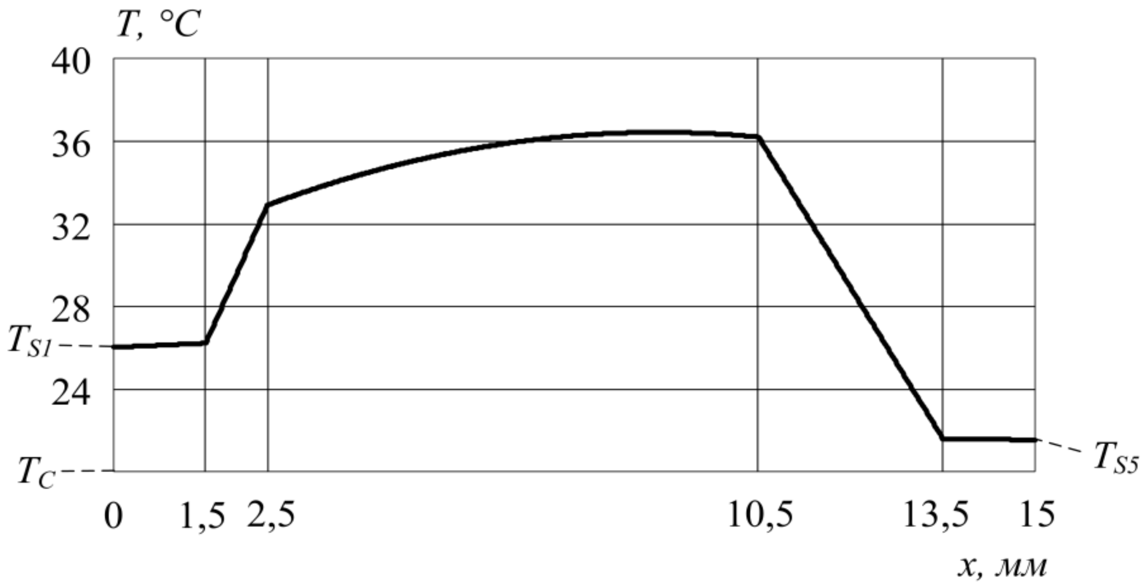


Рис.2.5. Теплове поле циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції

Аналізуючи теплове поле циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції видно, що його теплове поле не симетричне відносно середнього радіуса п’єзокерамічного елемента; максимум температури буде зміщений в сторону поверхні яка ізольована товщим шаром речовини (всередину перетворювача). Окрім того, всередині перетворювача існує ділянка, де є значний перепад температур, і де виникають значні температурні напруження, що можуть призвести до порушення механічної цілісності перетворювача. Таким чином, за запропонованою методикою можливо розрахувати теплові поля сучасних компенсованих рідиннозаповнених конструкцій перетворювачів циліндричного типу, враховуючи параметри конструкційних матеріалів та геометричні розміри їх складових елементів [66].

Висновки до розділу 2

Конструкцію п'єзокерамічного електроакустичного перетворювача стержневого типу стратифікували до трьох шарів, один з яких виділяє тепло – активний елемент. Для вирішення конкретної задачі та виділення процесу серед інших, записали умови однозначності: геометричні умови, фізичні, часові та граничні умови, серед яких рівність температур в точках контакту шарів та контакту з оточуючим середовищем, рівність теплових потоків між шарами та між шарами та середовищем.

Записавши умови однозначності і диференціальне рівняння енергії для трьох шарів, отримали кількісні значення температури на стінці контакту з середовищем і в кожній точці перетворювача на одновимірній поверхні перетворювача, графік розподілу температури в п’єзокерамічному перетворювачі стержневого типу, показано на рисунку 2.2. Аналогічну процедуру провели для циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції. Конструкцію циліндричного перетворювача стратифікували до п’яти шарів, результат розрахунку показано на рисунку 2.5 у вигляді графіку теплового поля.

За наданою методикою можливо отримати графіки розподілу теплового поля для інших варіантів конкретних моделей перетворювачів, записавши умови однозначності.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ КОНСТРУКЦІЙ ПЕП

3.1. Вибір програми для моделювання

Існує величезна кількість програм для креслення тривимірних моделей, найзручніші з них AutoCAD, Kompas, є також програми, розроблені спеціально для розрахунку виробів з п'єзокераміки PiezoCAD. Але для моделювання теплового поля вони не підходять. Необхідні вимоги для виконання завдання моделювання теплового поля перетворювачів: призначення матеріалів, завдання їх характеристик; завдання початкових умов; завдання температури; призначення різних способів теплопередачі; аналіз розподілу тепла. Далі коротко представимо деякі програмні продукти, в яких є можливість аналізу теплового поля.

В ANSYS можливе проведення як стаціонарних, так і нестаціонарних теплових розрахунків. Є можливість розрахунку лінійних і нелінійних характеристик матеріалів, теплопровідність всередині елементу так і між поверхнями, конвекція, випромінювання. Результати отриманих теплових полів можна передавати в інші аналізи для розрахунків. 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. Інструменти, які містить цей модуль, дозволяють вивчати механізми теплопередачі - теплопровідність, конвекцію і випромінювання, найчастіше разом з іншими фізичними явищами, наприклад, з області механіки, гідродинаміки, електромагнетизму і хімічних реакцій. Цей модуль використовують як один з тих, що допомагають вирішити інші завдання, коли виділення, поглинання або передача теплоти чи інших видів енергії є визначальним або важливим процесом. 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, параметрична оптимізація, випробування падінням, та інші лінійні та нелінійні аналізи та зручний різноманітний вивід інформації (наприклад в таблиці, що можна імпортувати в текстові редактори, графіки, безліч типів файлів). В книзі [67] показується аналогія структурного та термічного аналізу. Є додатковий модуль Flow Simulation, що дозволяє на додачу до твердих тіл аналізувати також текучі середовища.

Остання програма оптимальна для вирішення поставленого завдання аналізу теплових полів перетворювача, вона задовольняє вищезазначеним вимогам і має довідник з вичерпною інформацією - помічник з інструкцій та порад. Для аналізу в системі закладений алгоритм методу скінченних елементів

3.2. Опис програми для моделювання теплових полів

Метод скінченних елементів поділяє модель на велику кількість малих частинок простих форм – елементи. Елементи мають спільні точки, вони називаються вузлами. Всі програми, де застосовується метод скінченних елементів розглядають модель як мережу дискретних пов'язаних між собою елементів. Цей процес поділу моделі вкрай важливий, адже від якості побудованої сітки залежить точність подальших розрахунків. Побудову сітки можна контролювати автоматично застосувавши до всієї моделі, або вибірково (комбінована) – зменшуючи розмір елементів в найважливіших чи складних місцях. Програма визначає розмір елемента сітки, беручи до уваги об'єм фігури, площі поверхні та інші геометричні характеристики. Для об'ємних моделей створюються сітки з тривимірними тетраїдальними твердотільними елементами. Після побудови сітки, застосовуються параметри конкретного аналізу до її вузлів, а ці значення інтерполюються на весь елемент [68].

Для аналізу теплового поля тільки твердого тіла застосуємо додаток Simulation в SolidWorks. Він дає можливість розрахунку та розподіл температури в перехідному та стаціонарному режимі, розрахунок термічного опору в ділянці контакту деталей, аналіз механічного напруження, через теплове розширення. Механізми переносу теплоти: проводимість, конвекція, випромінювання. Програма працює методом кінцевих елементів і безпосередньо моделює тільки теплопровідність, конвекція моделюється в якості граничної умови. Конвекція задається параметром Convection (Вт/м$^2\cdot$К), а густина теплового потоку через Heat Power (Вт), тобто у випадку розрахунку роботи перетворювача потужність втрат. Відмінність теплової потужності (Heat Power) від теплового потоку (Heat Flux) в програмі, теплова потужність це фізична величина, що характеризує швидкість передачі і перетворення енергії, а тепловий потік – вектор, величина якого рівна кількості теплоти, що проходить через ізотермічну поверхню в одиницю часу. Термічний аналіз в програмі заснований на законі Фур'є про тепловий потік. При аналізі перехідного режиму, можливо використовувати джерела тепла як термостати.

3.3. Теплове поле стержневого перетворювача, отримане моделюванням

1) Температурне поле найбільш спрощеного стержневого перетворювача показано на рисунку 3.1. Коефіцієнт тепловіддачі 5.6 Вт/м^2 через конвекцію, встановлено тільки на тильної та випромінюючої накладки, ігноруючи тепловіддічу активного елементу, тільки теплопровідність в суміжні шари. Потужність тепловиділення активного елементу 15 Вт.

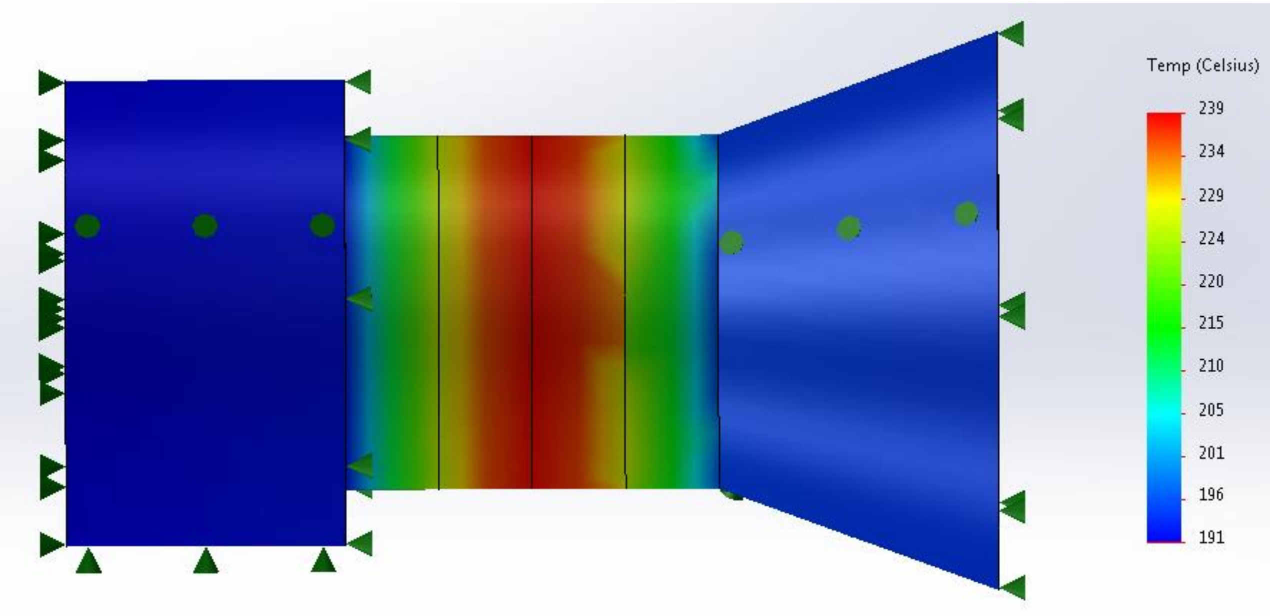


Рис.3.1.Теплове поле стержневого перетворювача побудоване моделюванням

Зменшення температури на випромінюючій накладці пояснюється більшою площею тепловідведення, ніж тільна накладка.

При застосуванні конвенції до всіх зовнішніх поверхонь (враховуючи активний елемент), максимальна температура зменшилась на 55 ^{0}C, мінімальна на 43 ^{0}C.

Для більш зручної візуалізації і співставлення результатів з тепловим полем аналітичного розрахунку, функцією Probe, був побудований графік температури перетворювача (рис.3.2):

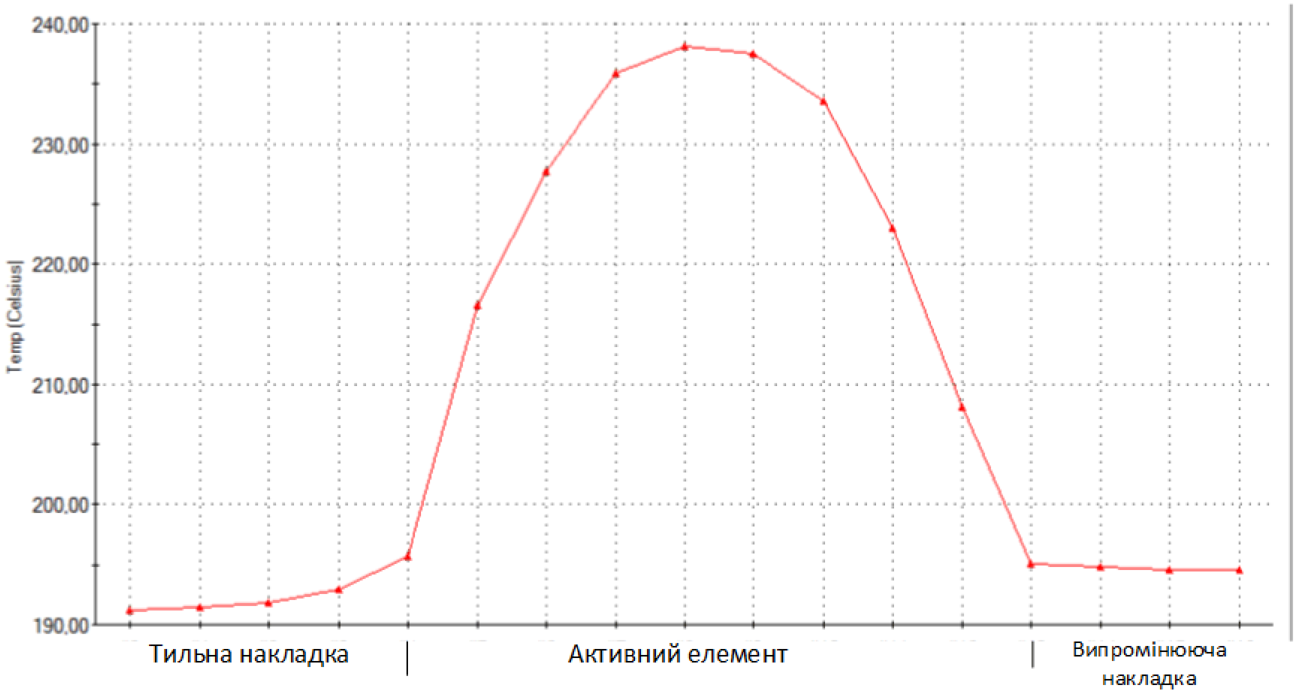


Рис.3.2. Графік розподілу температури в перетворювачі

2)Далі побудовано, перетворювач більш реальної конструкції, з урахуванням стягуючого болта та металевої шайби. Вони вносять значний вплив на теплове поле перетворювача, по-перше, через те що болт пов'язан з випромінюючою накладкою, по-друге, те що він заповнює порожнечу у п'єзокераміці і бере на себе частину тепла.

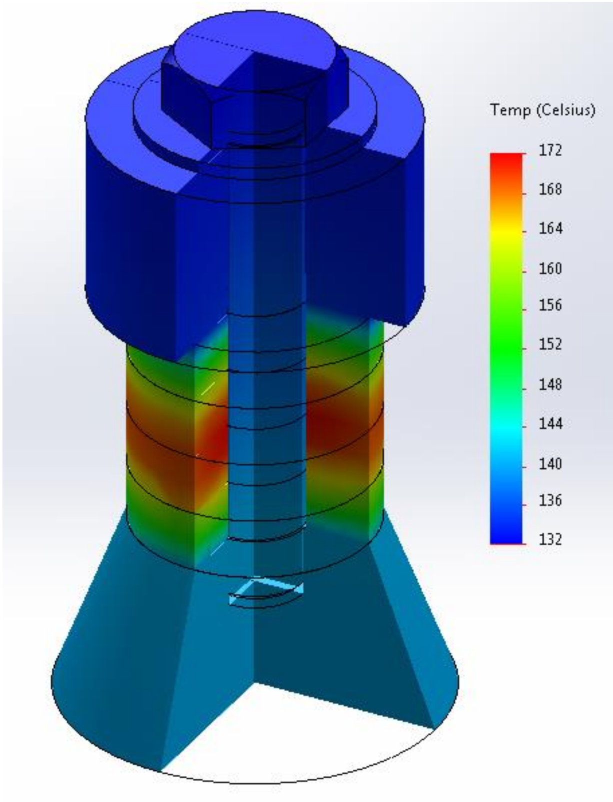


Рис.3.3 Теплове поле стержневого перетворювача з армуючим елементом

Графік розподілу температури на поверхні перетворювача з урахуванням стягуючого болта показано на рисунку 3.4:

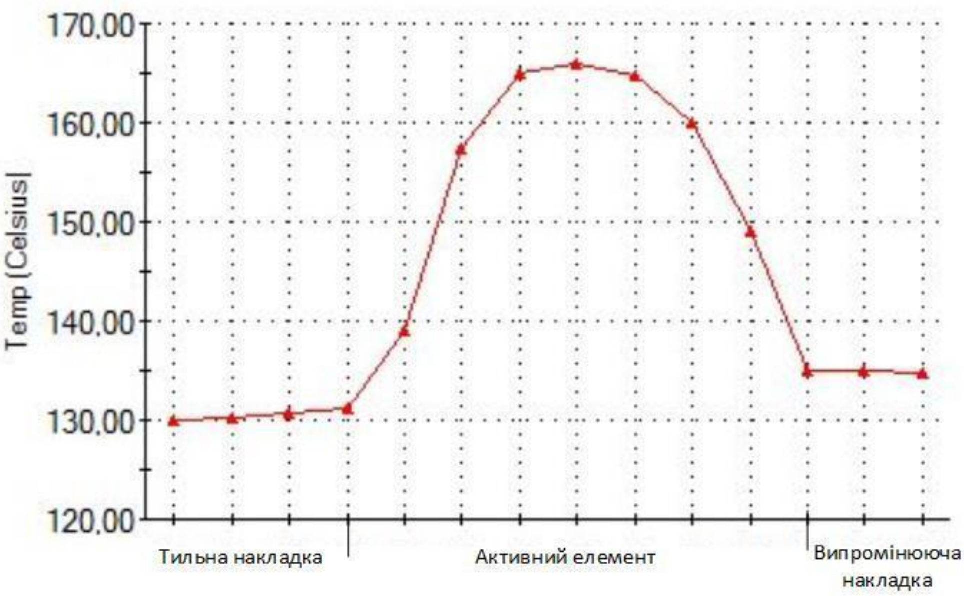


Рис.3.4. Графік розподілу температури на поверхні перетворювача з урахуванням болта

Попередні результати були отримані в сталому режимі, на рисунку 3.5 показано частину перехідного теплового процесу, взято три точки: на випромінюючій, тильній накладці та на середині активного елементу.

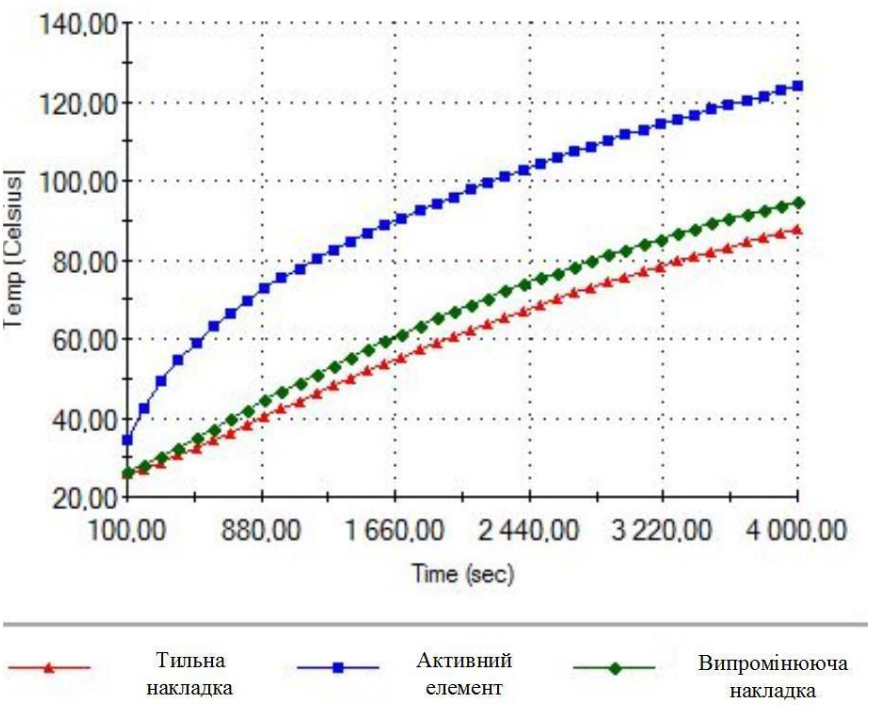


Рис.3.5. Графік частини перехідного процесу теплового поля перетворювача

З графіку можна зробити висновок, що перетворювач нагрівається достатньо довго, адже більше ніж за годину він не дійшов до усталеного режиму.

Для прикладу, за півгодини перетворювач нагріється до 100 ^{0}C, таке використання можливе і не нашкодить цілісності конструкції.

3.4. Теплове поле циліндричного перетворювача, розраховане моделюванням

Для моделювання теплового поля циліндричного перетворювача були розроблені 5 циліндричних шарів і назначені їм характеристики матеріалів, ідентичні до матеріалів з розділу 2.5 .

1) Модель перетворювача циліндричного типу компенсованої рідиннозаповеної конструкції та її теплове поле показано на рисунку 3.6:

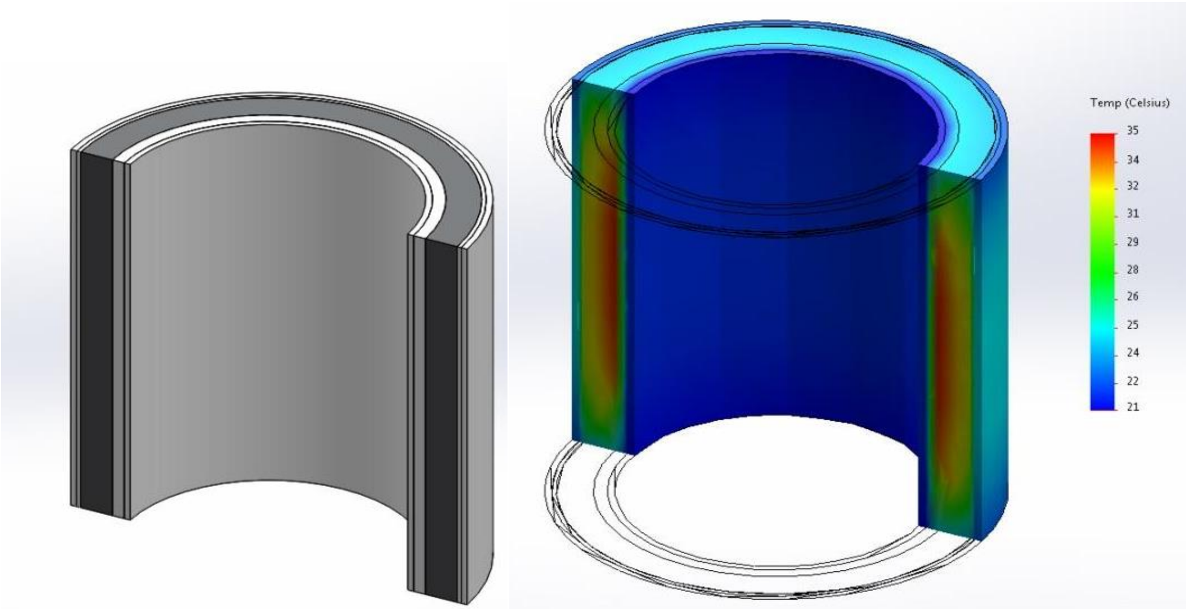


Рис.3.6. Циліндричній перетворювача компенсованої рідиннозаповеної конструкції: *а* – модель, *б* - теплове поле

Зауважимо, що на рисунку 3.6 *б* при моделюванні тепловіддача застосовувалась до всіх поверхонь, а не тільки до внутрішньої та зовнішньої поверхні, як в реальних умовах. В іншому випадку, поле рівномірне по товщині. Потужність втрат задано 66 Вт на активний елемент п’єзокераміки. Температура оточуючого водного середовища 20^{0}С.

Покажем графік розподілу теплового поля всередині перетворювача для наглядного порівняння з аналітичними розрахунками:

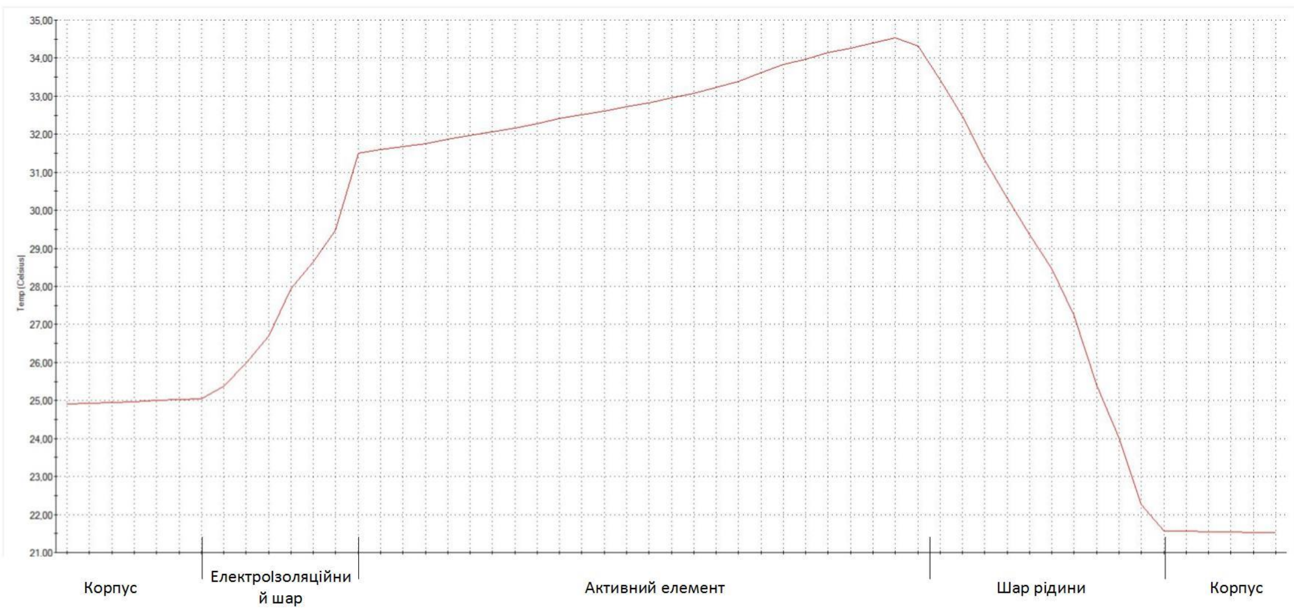


Рис.3.7. Графік теплового поля циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції

Далі було проведено моделювання конструкції циліндричного перетворювача з урахуванням торцевої герметизації (рис.3.8).

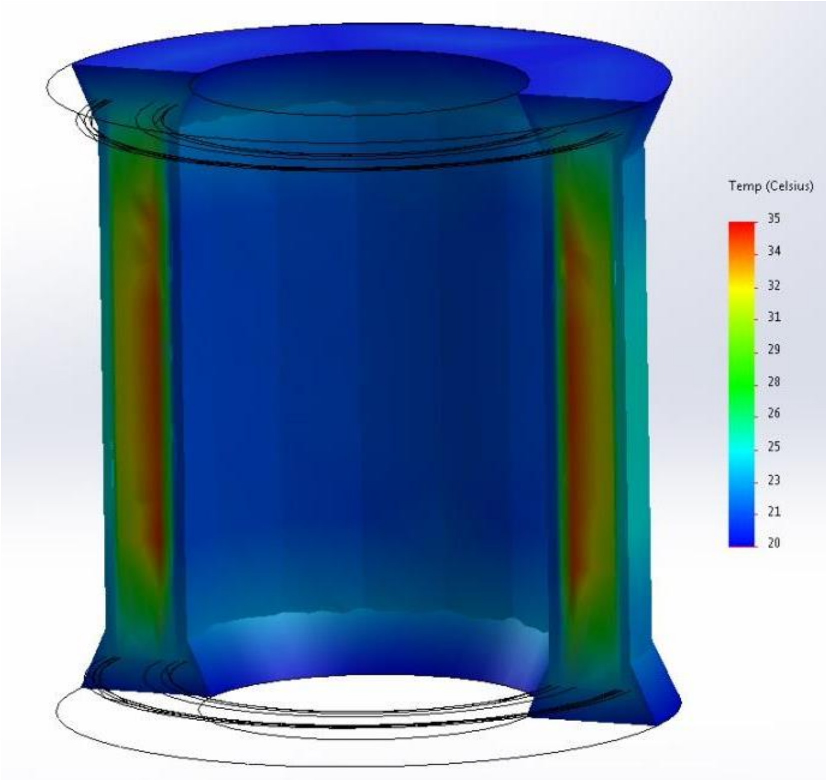


Рис.3.8. Теплове поле перетворювача компенсованої рідиннозаповеної конструкції з герметизацією торців

В результаті отримано теплове поле з розподілом тепла в горизонтальній площині схожий з рис.3.6. Але є відмінність температурного розподілу ближче до торців. Така конструкція максимально відповідає реальній конструкції циліндричного перетворювача.

3.5. Експериментальне вимірювання температури розігріву стержневого перетворювача

Опис експериментального дослідження температури розігріву працюючого перетворювача типу Ланжевен: за допомогою трьох приладів з термопарою (два мультиметра та один термометр), які кріпляться до перетворювача типу Ланжевен, вимірювалась температура перетворювача в режимі випромінювання. Щупи термопари кріпились за допомогою густої термопасти PcCooler GS-1, задля збільшення контактної площадки вимірювального щупа та фіксації. Термопаста (thermal compound) має коефіцієнт теплопровідності 8.5 Вт/м·К, густину 2.6 г/см³. Для поліпшення провідності тепла, до складу термопасти PcCooler GS-1, входить 5% срібла, сферичний нітрид алюмінію, окис цинку, для полімеризації та зменшення випаровування, а також кремній, який забезпечує стійкість до корозії, окислення й робить пасту стійкою до великої різниці температур, паста не електрично провідна. Точки кріплення (рис. 3.9): середина товщини тильної накладки, п'єзокерамічні кільця та середина товщини випромінюючої накладки. На перетворювач подається напруга з генератора ультразвукових коливань. Напруга на генератор подається через автотрансформатор з цифровою індикацією напруги. Випромінювання в повітря. Перетворювач типу Ланжевен має дві металеві накладки: тильну циліндричної форми з заглибленням під болт та випромінюючу у формі зрізаного конуса, 2 п'єзокерамічні шайби, стягуючий елемент, електроди з виводами. Потужність перетворювача 100 Вт, резонансна частота 60 кГц.

Рис. 3.9. Перетворювач типу Ланжевен

Початкова температура 23^0C, за 3 хвилини 30 секунд температура на тильній накладці стала 38.1^0C, на п'єзокераміці 45^0C, на випромінюючій накладці 28^0C (рис.3.10)

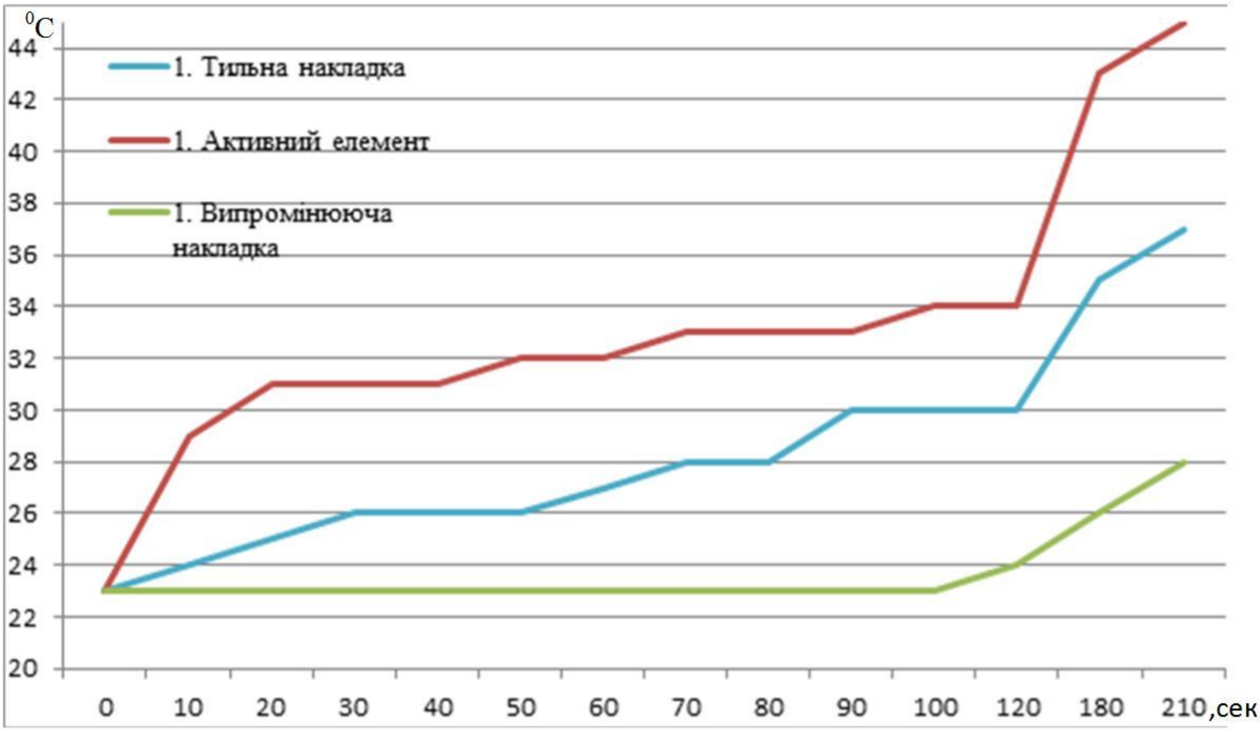


Рис.3.10. Графік експериментально виміряної температури, нагрів

При початковій температурі 30 ^{0}C за 60 секунд роботі перетворювача та 2 хвилини у режимі відпочинку перетворювача графік залежності температури виглядає наступним чином (рис. 3.11.):

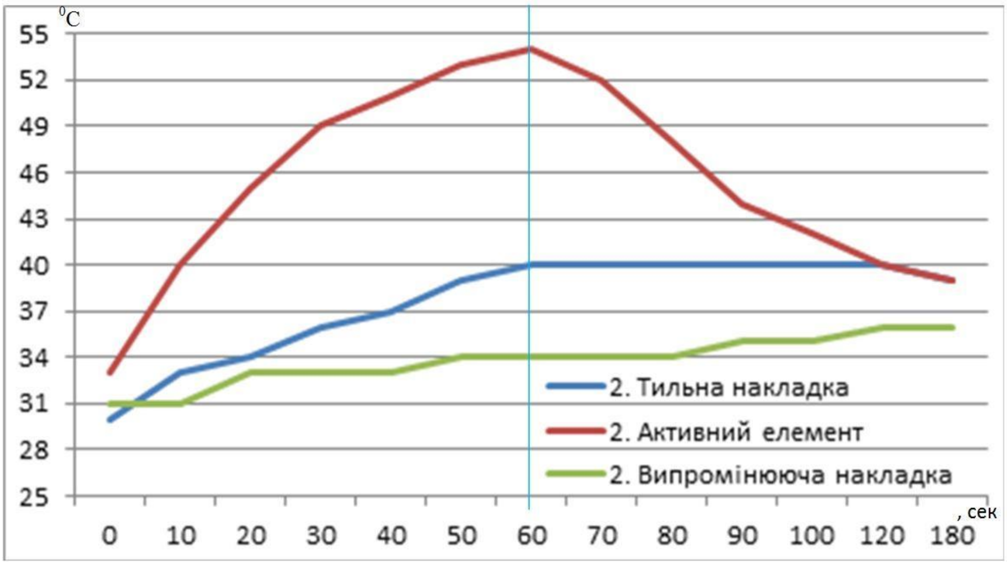


Рис. 3.11. Графік експериментально виміряної температури,нагрів та охолодження

З графіка можна зробити висновок, що імпульсний режим відношення роботи/відпочинок=1/2 не дозволяє перетворювачу охолонути до початкової температури, а випромінююча накладка продовжує нагріватись після вимкнення живлення. Це відбувається по-перше,за рахунок більшого об'єму випромінюючої накладки. По-друге, через більшу її теплоємність, адже в алюмінію 910 Дж/кг К, в сталі та п'єзокераміці 500 Дж/кг К.

Далі проведено 3 експерименти з часом роботи 60 секунд з майже однаковими початковими температурами (середнє значення цих експериментів на рис.3.12), після чого можна зробити висновок, що з кожним разом температура нагрівалась все швидше.

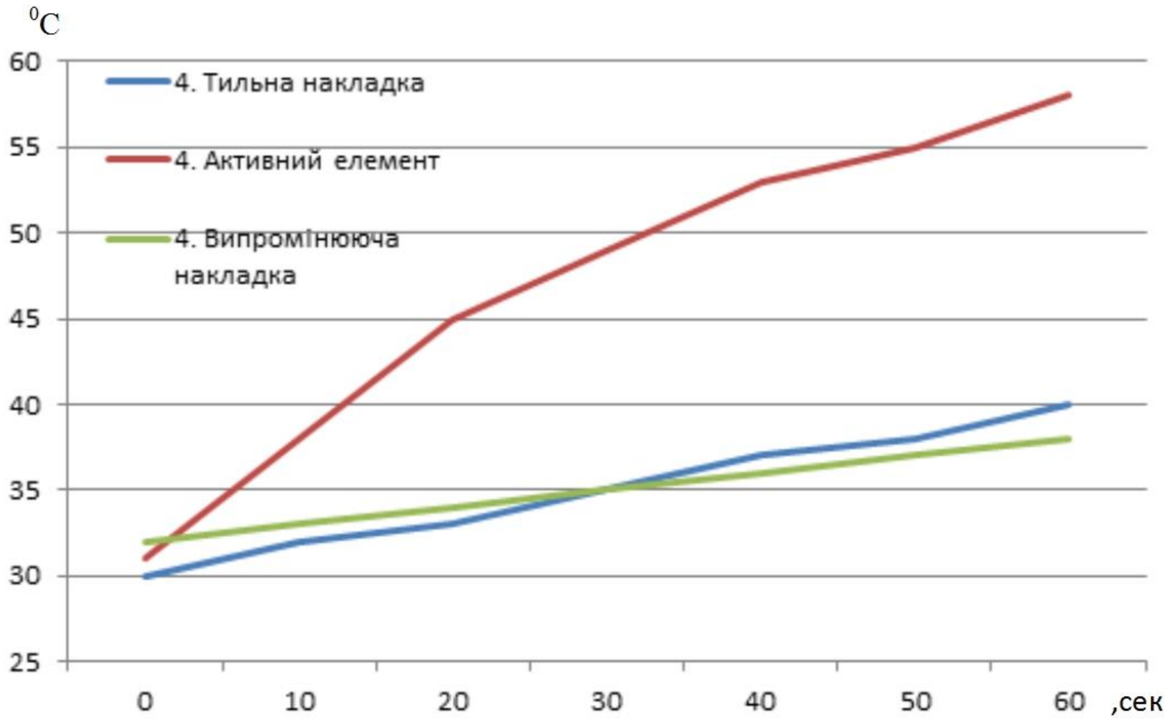


Рис.3.12. Графік експериментально виміряної температури

Приріст температури за час роботи 1 хвилина після неповного охолодження на п'єзокераміці становить 87%, а для перетворювача кімнатної температури лише 39%. А також продовження нагріву після припинення температури свідчить, що коливальна система має велику теплоємність. Навіть за додаткового активного охолодження, час перерви має бути в чотири рази більший за час роботи перетворювача.

Був змодельован перехідний процес стержнового перетворювача даної конструкції, потужність тепловиділення 15 Вт, початкова температура 23 ^{0}C. Точки зняття показань: на середині тильної накладки – червона лінія (location 1), посередині активих елементів – синя лінія (location 2), на середині випромінюючого елементу – зелена лінія (location 3) (рис. 3.13):

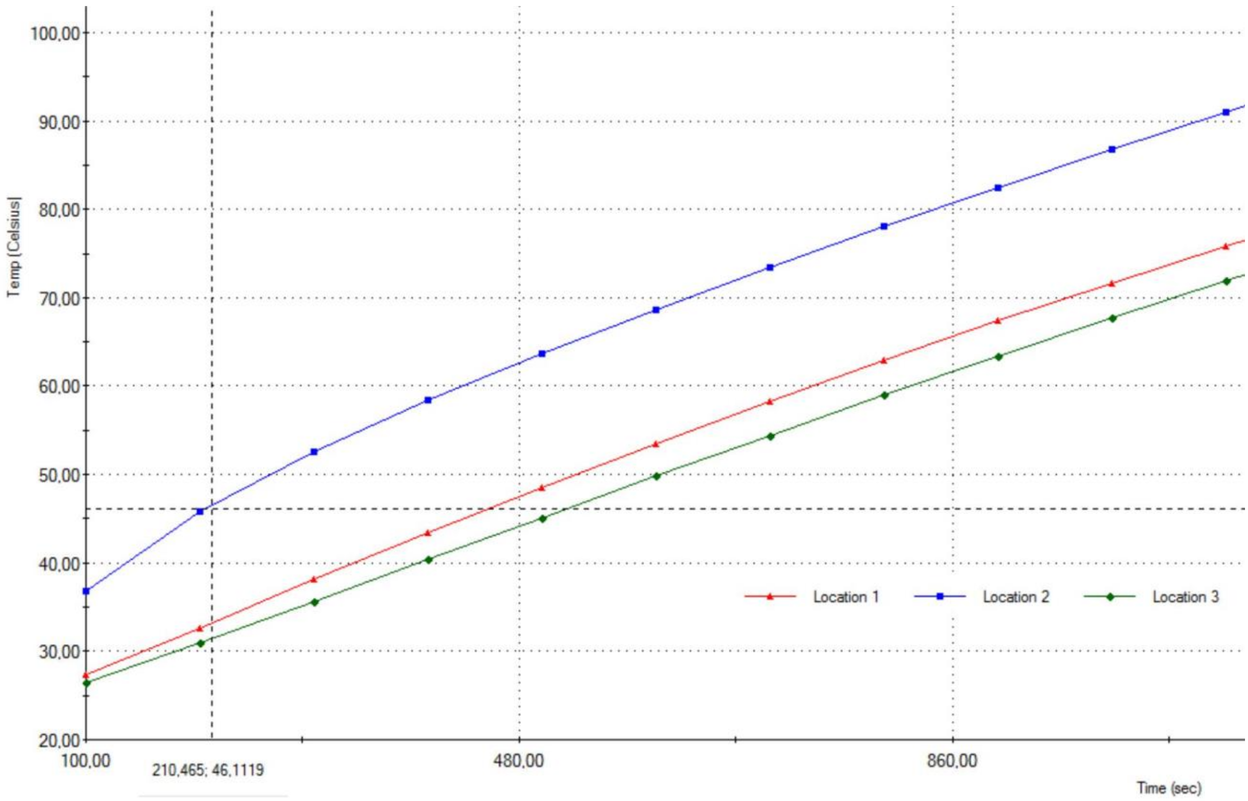


Рис. 3.13. Графік частини перехідного процесу стержневого перетворювача

На 210-ій секунді температура активного елементу 46 ^{0}C, тильної накладки – 33 ^{0}C, випромінюючої накладки - 30 ^{0}C. Порівнюючи з графіком на рисунку 3.10 різниця між експериментальними даними та даними моделювання становить 2.2%, 13,3%, 7% відповідно. Найбільша різниця температури тильної накладки можна пояснити тим, що її матеріал не відомий достовірно. Експериментальне дослідження підтверджує результати моделювання, що для стержневого перетворювача температура випромінюючої накладки менша за температуру тильної.

Висновки до розділу 3

Моделювання теплових полів проводилось в програмному забезпечені SolidWorks в додатку Simulation. Це дозволило отримати тривимірні теплові поля перетворювача, а також провести аналіз менш спрощеної моделі перетворювача, з урахуванням болта та шайби.

Для стержневого перетворювача проведено моделювання наближенної моделі до аналітичного розрахунку з розділу 2 та моделі реальної конструкції. Температурне поле для таких моделей різняться близько 30%, за рахунок тепловіддачі стінок активного елементу. Температура розігріву менша за температуру Кюрі для п’єзокераміки, але на межі робочої температури.

Для циліндричних перетворювачів максимальна температура розігріву не перевищує робочу температуру п’єзокераміки за рахунок того що, по-перше, перетворювач працює у воді і тепловіддача збільшується, по-друге, за рахунок великої площі контакту з герметизуючими матеріалами, які в свою чергу охолоджуються. Тому для циліндричних перетворювачів додаткові методи охолодження не актуальні. Необхідний аналіз теплових навантажень на конструкторському етапі для оптимального вибору матеріалів перетворювача, в залежності від початкових умов. Адже існують ділянки з значними температурними навантаженнями.

Проведено експериментальне дослідження стержневого перетворювача. За рахунок того, що випромінююча накладка з алюмінію, то тепло до неї легше переходить від п'єзокераміки, ніж до тильної накладки, через більший коефіцієнт теплопровідності. Але через також більшу теплоємність, алюмінію потрібно більше теплоти поглинути чи виділити, щоб нагрітися чи охолонути, що підтверджується на графіку нагрівання та охолодження рисунку 3.11.

Моделювання перехідного процесу теплового поля та експериментальна залежність підтвердили, що для запобіганню перегріву понад деяку температуру ефективним буде імпульсний режим, але час охолодження повинен бути більший за час роботи. Температура активного елементу відрізняється у 2.2%.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

В даному розділі за допомогою комп'ютерного моделювання нагріву ПЕП проаналізовано питання ефективності різних методів охолодження. Для початку мова йтиме про трьохкомпонентний перетворювач з стягуючим болтом без врахування корпусу. Далі внесено ускладнення моделі перетворювача - додавання корпусу. Будь-яке втручання в зміну конструкції перетворювача, вносить корективи в його роботу, це логічно. Ми добиваємось зменшення температури розігріву, але тим самим такі позитивні зміни призводять до інших. В даному розділі досліджено також одну з головних характеристик ПЕП – зміну резонансної частоти коливальної системи.

4.1. Варіанти зменшення температури розігріву перетворювача

Не конструкторськими методами зменшення температури нагріву перетворювача можна назвати обмеження з підрозділу 1.3., адже ці поняття тісно пов'язані. Даючи певні обмеження, ми, звісну зменшуємо температуру розігріву перетворювача, але й зменшується також його продуктивність і ефективність. В деяких областях застосування ультразвукових перетворювачах, такі обмеження не відіграють важливої ролі. Як от наприклад, в діагностичній медичній техніці.

1) Традиційно, обмежують час використання перетворювача, а також його режим. Перетворювач працює в імпульсному режимі, і в період «відпочинку» охолоджується [18].
2) Обмежують амплітуду коливань, швидкість коливань.
3) Змінюють матеріали п'єзокераміки, та накладок, електродів, клейового з'єднання.

Розглядати більш детально обмеження в цьому розділі не будемо, так як інформація вже описана в першому розділі.

З приводу зміни матеріалів, опишемо детально наступне:

1. Вибір матеріалу електродів.

Порівнюючи срібло Ag та мідь Cu, електрична провідність платини Pt, та паладію Pd в десять разів менша, але срібло та мідь швидше окислюються під час спікання та потребують більш ретельної підготовки [25] .

Щодо електродів, теплопровідність міді $\lambda_{мідь} = 300 - 320$ Вт/(м·К), платини $\lambda_{платина} = 71.6$ Вт/(м·К), а пєзокераміки $\lambda_{пк} = 1.9$ Вт/(м·К), тому звичайно що мідь буде краще передавати тепло в зовнішні шари деяких конструкцій перетворювачів. Наприклад [8], в конструкціях багатошарових п'єзоелектричних трансформаторах (тобто потужних), де використовують більше шарів п’єзокераміки (в цьому джерелі порівнюють 10, 25, 100 шарів), там поверхнева температура значно зменшується (120 ^{0}C, 100 ^{0}C, 80 ^{0}C) саме завдяки великої кількості внутрішніх шарів металевих електродів.

2. Вибір п'єзокераміки та матеріалів накладок.

Зазначимо, що багато проаналізованих дослідів з характеристиками п'єзокераміки проводились на окремому зразку. І треба брати до уваги, що чутливість п'єзокераміки росте при інтегруванні її в пристрій і мати на увазі це, при виборі п’єзокераміки. Так виходить через різницю коефіцієнтів теплового розширення. В пасивних матеріалів він більший за коефіцієнт в п’єзокераміки.

При роботі перетворювача на високих потужностях чи при високій температурі зазвичай існує компроміс між високою температурою Кюрі та п’єзоелектричними властивостями, де матеріали, що володіють високими значеннями температури деполяризації, зазвичай мають нижчу п’єзоелектричну чутливість [20]. М’яка п'єзокераміка має більші діелектричні константи, ніж жорстка [38].

Навіть попри те, що для потужних перетворювачів частіше використовують жорстку п’єзокераміки. Але є дослідження м'яких п'єзокерамічних зразків, що досить добре себе поводять при збільшенні температури. Експеримент з PZT (складається з Pb(Zr0;5Ti0;5)O3, температурі Кюрі 350^{0}C) [69] показав, що п'єзокераміка має досить стабільні показники для: коефіцієнта електромеханічної зв'язку k_p, коефіцієнта механічної добротності Q_m, діелектричної проникності ε (реальна та уявна частина), тангенсу втрат $\tan\delta$, констант п'єзоелектричного заряду d_{33} і d_{31} та п'єзомодулі по напрузі g_{33} та g_{31} при температурі до 150^0С. Але іншій експеримент [38] з біморфними перетворювачами (для збору енергії) в нагрівальній камері показує, що п'єзоелектрична константа -d_{31} та діелектрична константа в жорсткої PZT стабільна при підвищенні температури до 150^0С, на відміну від м'якої PZT, в якої ці характеристики ростуть. Та й загалом, коефіцієнти м'якої PZT п'єзокераміки все ж таки більше піддатливі зміні температури через динаміку доменної структури [48].

Тут також опишемо трохи іншу досить сучасну модифікацію п'єзокераміки – це її композити. *П'єзоелектричні композити* - це клас функціональних матеріалів, що складається з п'єзоелектрична активних матеріалів та неп'єзоелектричних пасивних полімерів, механічно з'єднаних між собою для утворення різних зв'язків. За рахунок різноманітних фізичних властивостей полімерів (низький модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона або висока теплопровідність), можна покращувати необхідні параметри п’єзокераміки. Проте з збільшенням теплопровідності полімеру (такі матеріали мають високі значення модуля пружності, що веде до збільшення демпфера структури), зменшується добротність п'єзокомпозиту [20]. Деякі п'єзокомпозити можна використовувати при температурі 300^0С. За рахунок додавання до полімеру теплопровідних часток, можна збільшити теплопровідність, але разом з тим й жорсткість матеріалу. В [70] описано процес нагрівання та охолодження одно зразка п'єзокомпозиту – на резонансі підвищення температури майже на 30% більше ніж на не резонансній частоті, а також оцінений коефіцієнт конвекційної тепловіддачі в повітря - (6-10) Вт/м^{2}К. Такі матеріали показали добру перспективу розвитку, але дана методика (виготовлення, підбір матеріалів, оцінка характеристик) ще потребує вдосконалення та подальшого вивчення для оптимального використання.

Щодо вибору *матеріалів накладок*, звичайно першочергово матеріали обирають згідно з призначенням перетворювача, особливо випромінюючу накладку. Але також необхідно мати на увазі наступне. В [71] пишуть, що для вибору матеріалів для накладок потужного перетворювача необхідно не тільки підібрати за характеристиками акустичного імпедансу відповідним до п'єзокераміки, а також треба узгоджувати такі важливі фактори як: теплопровідність, оброблюваність, схильність до корозії, а також механічну міцність матеріалу.

Такі варіанти зменшення нагріву пристрою незалежні від наявності корпусу, адже розглядається повна незалежна конструкція перетворювача.

4.2. Зменшення температури розігріву перетворювачів конструкторськими методами, пасивні та активні методи. Аналітичний опис.

Для зменшення температури розігріву будь-якого приладу застосовуються додаткові системи охолодження. Як і в будь-якій області застосування електронних приладів системи охолодження можуть бути двох типів – *пасивними та активними*.

4.2.1 Пасивні методи

До перших належить пасивні тепловідводи, різноманітні види радіаторів. В таких випадках використовується природний шлях відведення тепла: теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання. Пасивна система охолодження ґрунтується на тому, щоб установка мала можливість швидше охолодити або відвести тепло від більш вразливих компонентів. В даній роботі мова йдеться про ПЕП, тому найбільш вразливий компонент – п'єзокераміка. Такий метод використовується при неможливості замінити матеріали, наприклад на п'єзокерамічні композити, або працювати з зупинками на охолодження. Ефективністю пасивного методу, тобто швидкістю та якістю відводу тепла, можна керувати за допомогою двох параметрів - площі поверхні тепловіддачі і теплопровідності (тобто перенести тепло до менш вразливих компонентів).

1)Найпоширеніший спосіб пасивного охолодження – різновиди радіаторів. Суть радіаторного методу в тому, що додають чи замінюють де це можливо, зовнішню оболонку на таку, що має перпендикулярні ребра. Тим самим збільшуючи поверхневу площу компонента, тобто площу поверхні тепловідведення. Чим тонше ребра радіаторів - тим він ефективніший.

Як виявилось, радіаторні ребра в п’єзокерамічному перетворювачі вже були запатентовані майже 60 років тому [72]. Там описувались поздовжні зазубрини на тильній накладці. Також такі зміни форми тильної накладки описувались в [73]. В тій модифікації також додали пластину між кільцями п'єзокераміки з радіаторними зазубринами.

Для досягнення ефекту зниження температури не обов'язково застосовувати принцип радіаторних ребер. Досить змінити форму накладки на ту, яка має більшу поверхню [74]. Цікаво, що існують конструкції перетворювачів з охолоджувальними поздовжніми отворами в тильній накладці.

2)Дуже часто застосовують зміну форму випромінюючої накладки. Популярність такої зміни обумовлена перш за все не з урахуванням зменшення максимальної температури розігріву. На те існують інші фактори, хоча збільшення площі поверхні має позитивно впливати. От наприклад, для збільшення числа резонансних частот перетворювача [75] або амплітуди. Перетворювачі з випромінюючою накладкою в формі прямокутної пластини, скріпленої з Ланжевеновим перетворювачем тонким стержнем показав [30], що для потужного випромінювання відсутні нелінійні ефекти, пов'язані зі збільшенням температури.

3) В галузі буріння гірських порід також застосовують перетворювачі типу Ланжевен. *Зміна форми стягуючого болта* на таку, що має порожнечу всередині дає кілька переваг. Мається на увазі наскрізна порожнина, і в накладках також. По-перше, коли необхідно дістати зразок породи, його можна протягнути крізь перетворювач, не витягуючи того. По-друге, такі установки мають більшу площу охолодження завдяки додаткової внутрішньої поверхні, які доступні до теплообміну. В [76] порівнюють два варіанти: болт можна перемістити назовні конструкції, як циліндр або як кільце з периферійних стовпів, або болт можна утримати всередині датчика, але зробити порожнистим. З порожнистим болтом є деякі нюанси, які потребують ще детальнішого вивчення, а саме – більш небажані режими згинання, ніж у традиційних твердотільних перетворювачів Ланжевена.

4)Також до пасивних методів охолодження слід віднести *тепророзсіючі шари* [54]. Їх суть в тому, щоб через елементи з більшим коефіцієнтом теплопровідності відвести тепло від нагрітого елементу, можна сказати - ‘додати перехідний шар’. Для теплорозсіючих шарів використовують графітові стрічки, та алюмінієву чи мідну прокладку [54].

В типовій конструкції перетворювача типу Ланжевен, положення п'єзокерамічних елементів визначається у вузлі поздовжніх коливань для досягнення великих амплітуд поздовжніх коливань та високої вихідної потужності пристрою. Але найбільший тепловий потік виробляється саме в цьому місці. Тому застосовують розділення п’єзокерамічних кілець додатковими центральними металевими накладками [77–80]. Прямого підтвердження саме зменшення температури в цій роботі немає, але точно є зміна максимальної температури нагріву від ефекту зміщення активного елементу відносно вузлової площини коливань за рахунок компенсації довжини обох накладок, тобто довжина перетворювача залишається незмінною [12]. Так при такій модифікації перетворювача, ще є важливим елементом, чи закріплена нововведена центральна накладка з болтом, чи вона має змогу переміщуватись незалежно від болта. В [81] показано, що коли центральна накладка з'єднана з болтом, то в перетворювачі збільшуються дисипативні втрати енергії, та механічні втрати через збільшення тертя з іншими елементами.

Застосування *тепловідвідної вставки,* яка розміщена між п’єзокільцями дає ряд переваг по зменшенню максимальної температури всередині активного елементу, в цьому випадку розрахуємо приклад мідної вставки. Так як ми “розбавляємо” або додаємо матеріал з набагато більшою теплопровідністю $\lambda_{мідь} = (300-320)\,\text{Вт/ м}\cdot\text{К}$ до $\lambda_{алюміній} = (110-240)\,\text{Вт/ м}\cdot\text{К}$ (такий перепад через велику різноманітність алюмінієвих сплавів,наприклад, для сплаву Амг6 – більш точною цифрою є нижня границя) або до п'єзокераміки з теплопровідністю в середньому $\lambda_{пк} = 1.9\,\text{Вт/ м}\cdot\text{К}$. Але для компенсації лінійного теплового розширення матеріалів [78] слід враховувати наступне – висота вставки $h_{вставки}$, знаходять з наступного співвідношення, за умови, що $\alpha_{вставка} > \alpha_c$:

$$\frac{h_{вставка}}{h_{пк}} = \frac{(\alpha_c - \alpha_{пк})}{(\alpha_{вставка} - \alpha_c)},$$

де $h_{пк}$ - сумарна висота п’єзопластин; $\alpha_{пк}$ – коефіцієнт теплового розширення п'єзокераміки; α_c – коефіцієнт теплового розширення стягуючого елементу; $\alpha_{вставка}$ – коефіцієнт теплового розширення для міді.

$\alpha_{сталь} = (11.5 - 13) \cdot 10^{-6} \quad {}^0C^{-1}$

$\alpha_{пк} = (1-4) \cdot 10^{-6} \quad {}^0C^{-1}$, якщо брати більш конкретні значення для п’єзокераміки типу PZT [20], то $\alpha_{PZT} = (2-3) \quad ppm/{}^0\,C^{-1}$ (ppm – parts per million, тобто 10^{-6})

$\alpha_{мідь} = 16.6 \cdot 10^{-6} \quad {}^0C^{-1}$

$\alpha_{АМг6} = 24.7 \cdot 10^{-6} \quad {}^0C^{-1}$, в цілому для алюмінієвих сплавів цей коефіцієнт трохи нижче.

В результаті обчислень отримали, що мідна вставка має бути висотою приблизно від 50 мм до 130 мм. А алюмінієва вставка близько (34-37) мм. Результати з мідною вставкою здаються зовсім абсурдними, тому скоріш за все мідь краще підходить для тонких прослойок, наче вищезгаданих плівок, до двох мм, або також нижче буде запропоновано варіант мідної вставки в формі стакану між п'єзо кільцями. Обчислення з алюмінієвою вставкою дуже схоже на такі, що застосовуються в реальних конструкціях, такі вставки ще називають центральною накладкою, як згадувалось вище.

5) Заповнення корпусу ПЕП

З пасивних методів охолодження для перетворювача стержневого типу доступні цікаві варіанти вирішення проблеми перегріву, які неможливо застосувати до інших типів акустичних перетворювачів. Йдеться про заповнення вільного простору між корпусом перетворювача і основними компонентами перетворювача. При роботі ПЕП в повітрі, корпус перетворювача створює додатковий об’єм, що швидко нагрівається. Корпус слугує для зручності використання пристрою та для механічного захисту елементів конструкції перетворювача, таких як п'єзокераміка, електричні з'єднання. Навіть при наявності в корпусі великого об'єму повітря проблема нагрівання залишається, як наприклад, в ультразвуковій мийці [82].

Цей простір можна використовувати з величезною перевагою для поліпшення теплового режиму. Заповнювати можна газом, електроізоляційною рідиною або навіть спеціальною сумішшю з порошком [83].

Якщо перетворювач не передбачає ремонт, то його заливають компаундом. В такому випадку, пропонується залити сумішшю заливного матеріалу та теплопровідним порошком, по типу термопасти. У вищезгаданій роботі запропоновано використовувати прошарок спеціальної суміші з заливочного матеріалу і теплопровідного порошку для відведення тепла в корпусі перетворювача. Матеріал заливають між п'єзокерамікою та корпусом. В якості теплопровідного порошку пропонують використовувати порошок з нітриду алюмінію, нітриду бора, алюмінію, міді чи срібла. Для заливочного матеріалу використовують силіконовий каучук чи електроізоляційною резиною, в залежності від вибору порошку. Абразивні властивості порошку не діють на п’єзокераміку, через нейтралізацію їх силіконовою заливкою. Процес створення нового матеріалу повинен супроводжуватися низкою випробувань, так як коефіцієнт теплопровідності і твердість по Шору визначається тільки дослідним шляхом [83]. На нього суттєво впливатиме розмір і співвідношення метала до силікону. Коефіцієнт теплопровідності порошкоподібних тіл сильно залежить від їх щільності. Тому, для подальшого дослідження орієнтуватимемось на вже відомі матеріали з схожими властивостями – термопаста. Візьмемо необхідні значення для прикладу термопасти з алюмінієм Prolimatech PK-1: густина 3200 кг/м3, коефіцієнт теплопровідності складає $\lambda_{термопаста} = 10.2 \quad Вт / м \cdot К$.

Використання герметичного корпусу часто є необхідною умовою для ПЕП, та рідко коли важливо заповнювати його тільки повітрям, так як є ймовірність електричного пробою. Розглянемо (а пізніше і покажемо) переваги заповнення корпусу, акцентуючи увагу на зменшенні максимальної температури нагріву. Ефект зменшення температури розігріву п’єзокераміки досягається збільшенням теплопровідності оточуючого її середовища, тобто переносом тепла на корпус перетворювача.

Найпопулярніше заповнення – електроізоляційна рідина, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{ел.–із.рідина} = 0.17 \quad Вт/м \cdot К$. Також часто заповнюють інертним газом. Але тут варто враховувати теплопровідність газу, наприклад, у неону $\lambda_{неон} = 0.0493 \quad Вт/м \cdot К$, якщо порівняти з повітрям – $\lambda_{повітря} = 0.026 \quad Вт/м \cdot К$, то можна дещо виграти в максимальній температурі нагріву. А якщо взяти ксенон з теплопровідністю $\lambda_{ксенеон} = 0.0057 \quad Вт/м \cdot К$ буде тільки гірше. Найпоширеніше заповнення елегазом, через його електроізоляційні властивості $\lambda_{SF6} = 0.0136 \quad Вт/м \cdot К$, тож бачимо, що для перетворювачів, у яких потрібно знизити температуру нагрівання, таке заповнення невдале.

Цікаво, що рідини (крім розплавлених металів) мають невелику величину теплопровідності 0,09 ...0,7 $Вт/м \cdot К$. У більшості рідин (крім води і гліцерину) коефіцієнт теплопровідності зменшується зі збільшенням температури. В той час, як гази і пари погано проводять теплоту теплопровідністю 0,006...0,58 $Вт/м \cdot К$ і коефіцієнти теплопровідності газів збільшуються з ростом температури.

Заповнення корпуса газом чи певною рідиною також можливо віднести й до активного охолодження, коли йде примусова циркуляція.

4.2.2 Активні методи

До активних методів охолодження приладу віднесемо такі, які вимагають додаткового живлення, тобто вентилятори чи застосування компресора і термоохладітелей. Вони збільшують характеристики маси та габаритів пристрою. З активних методів охолодження найчастіше використовується продувка повітрям,газом [79] чи примусове рідинне охолодження [84]. Ці методи досить ефективні, хоча й трудоємні.

При природної конвекції повітря не в змозі прийняти більше 5-10 Вт теплової енергії з одиничної поверхні теплообміну [85]. Краще охолодження забезпечує примусова конвекція за рахунок обдування вентилятором. В даний час випускаються вентилятори, мінімальні розміри яких становлять 2 см^2, але навіть вони не завжди можуть бути оптимальним варіантом вибору метода охолодження для ПЕП.

Ефективність повітряного охолодження можна оцінити з формули коефіцієнта тепловіддачі:

$$a = 5.6 + 4v, \quad \mathrm{W/}(\mathrm{m}^2 \cdot K)$$

де v - швидкість руху повітря, що подається. Як бачимо, чим більше швидкість обдування, тим більше тепла поверхні (в даному випадку стінки перетворювача) зможе віддати навколишньому середовищу.

Слід зауважити, повітря або газ, що подається, повинен мати певні параметри: бути холодним і сухим, а для цього потрібна окрема установка - компресор, осушувач, фільтр [83]. Такий спосіб охолодження може бути невигідним для безперервної роботи перетворювача, особливо на великих потужностях. Також присутні обмеження на герметичність конструкції, так як для обдування нагрітих елементів потрібно вхід і вихід до корпусу.

Для рідинного охолодження тепловіддача підвищується в сотні разів. Тепловіддачі від металевої стінки в текучу рідину визначається виразом:

$$a = 350 + 2100\sqrt{v}, \quad \mathrm{W/}(\mathrm{m}^2 \cdot K)$$

де v - швидкість руху рідини, що обтікає. Навіть помітивши незаперечні переваги і ефективність рідинного охолодження, у нього також є свої недоліки. Наприклад, слід продумати відведення вже нагрітої охолоджуючої рідини, так як вона також може заважати роботі і собою нагрівати робочу середу, як це описано в стоматологічній практиці [86]. А також важливо продумати зберігання цієї самої рідини, адже для потужної промислової установки з вихідною акустичної потужністю в воду до 3 кВт, потрібно 5 л / хв. охолоджуючої рідини.

4.3 Дослідження ефективності конструкційних способів охолодження стержневих перетворювачів. Моделювання.

4.3.1 Постановка задачі

Досліджується п’єзокерамічний електроакустичний перетворювач типу Ланжевена (стержневого типу), що складається з двох пасивних накладок (тильна та випромінююча накладки), активного елементу, шайби, які стягуються болтом (рис. 4.1). Корпус *(В дослідженні в підрозділі 4.3.2 – корпус з кільцем-кріпленням відсутні, в підрозділі 4.3.3 вони присутні)* кріпиться до перетворювача через елемент механічної розв’язки.

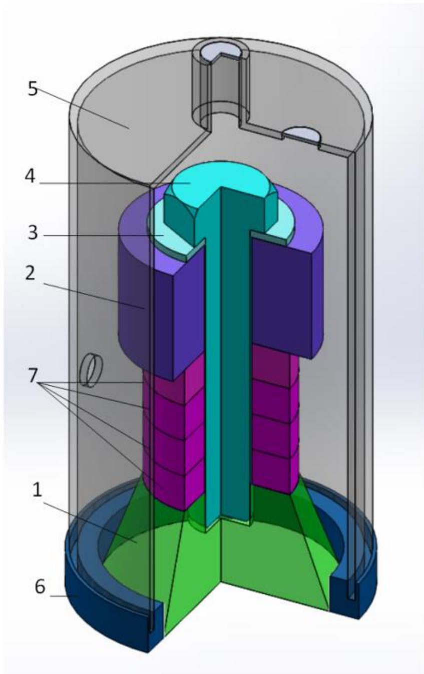


Рис.4.1. Модель п’єзокерамічного електроакустичного перетворювача типу Ланжевен: вкажіть значення: 1 – випромінююча накладка; 2 – тильна накладка; 3 – шайба; 4 – болт; 5 – корпус; 6 – кільце-кріплення; 7 – активний елемент

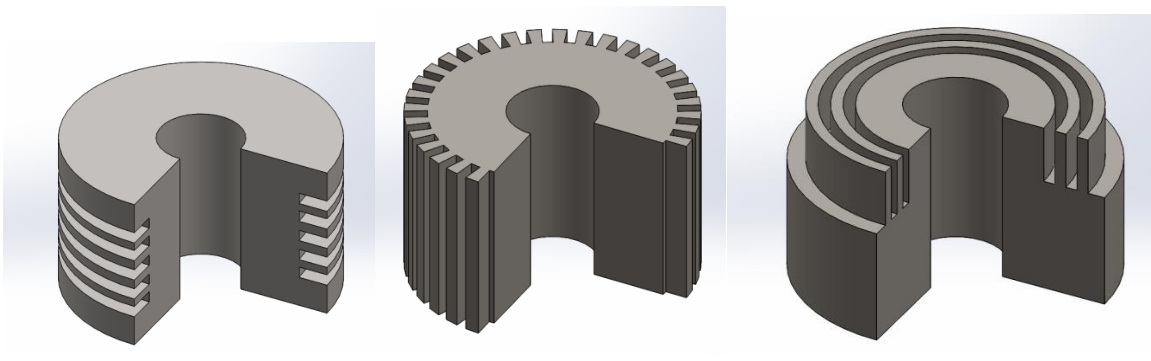
Випромінююча накладка 1 виготовлена зі сплаву алюмінію АМг6 в формі зрізаного конуса розміром великого діаметру 60 мм, меншого діаметру 38 мм та товщиною 30 мм. Тильна накладка 2, шайба 3, болт 4 виготовлені зі сталі AISI 1020. Зовнішній діаметр тильної накладки циліндричної форми становить 50 мм, внутрішній – 17 мм. Стягуючий болт М16 довжиною 82 мм вкручується в випромінюючу накладку на 10 мм та ущільнюється шайбою діаметром 36 мм, товщиною 2 мм. Корпус 5 циліндричної форми, виготовлений з алюмінію, одягнений на перетворювач через кільце-кріплення з компаунду 6. Активний елемент 7 це – 4 кільця з п’єзокераміки APC-840, зовнішній діаметр 38 мм, внутрішній діаметр 17 мм, товщина кожного 10 мм. Перетворювач працює в повітрі, потужність втрат становить 15 Вт. Початкова температура 25 °С. Зауважимо, що дані параметри не відносяться до конкретного перетворювача, а несуть в собі збірні характеристики найбільш вживаного перетворювача Ленжевенового типу.

4.3.2 Без урахування корпусу перетворювача

Теплові поля будемо розглядати в SolidWorks Simulation.

1) Зміна форми тильної накладки.

Розглянемо три варіанти зміни форми тильної накладки (рис.4.2), на які можливо замінити класичну циліндричну, для збільшення тепловідводу. Вважалося, що головні принципи: збільшення площі поверхні, але при цьому не змінювати масу та висоту накладки. Тоді резонансні частоти не зміняться. Але це твердження перевіримо далі, у кінці розділу. Перший варіант – радіаторні ребра по боковій стінці, наступний – вертикальні ребра та циліндричні ребра. Масова різниця від початкових 411 г становить не більше 1 % для всіх варіантів.



а б в

Рис.4.2. Тильна накладка: *а* – з горизонтальними ребрами; *б* – з вертикальними ребрами; *в* – з циліндричними ребрами

Покажемо теплові поля перетворювача, застосувавши усі три варіанти зміни форми тильної накладки на рисунку 4.2:

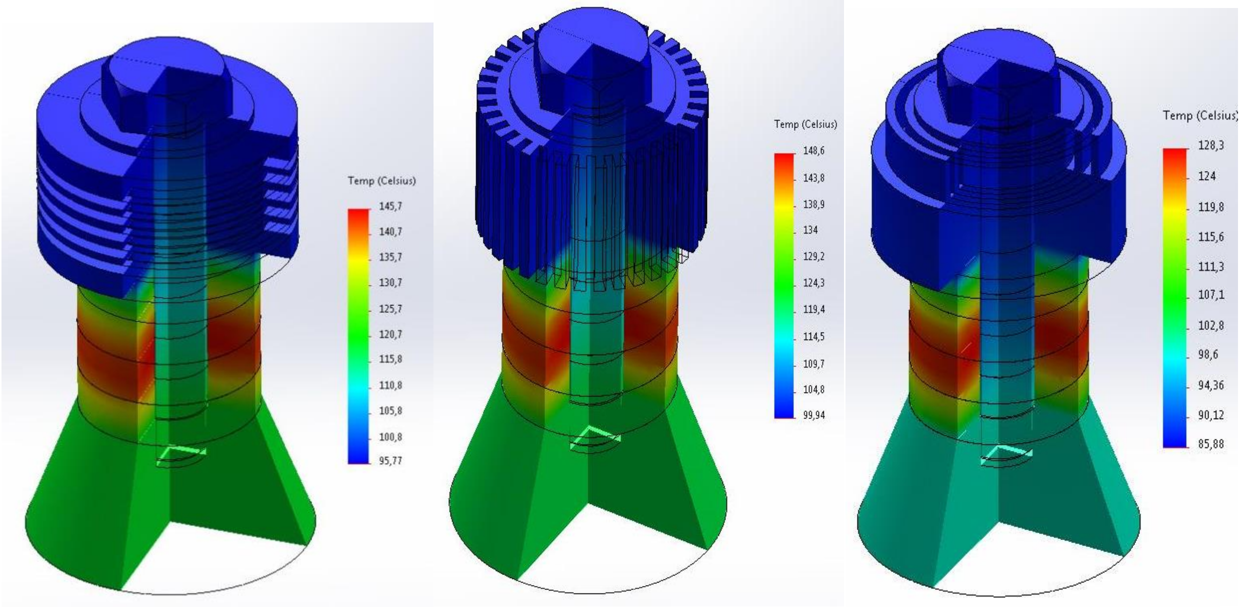


Рис.4.2. Теплове поле перетворювача зі змінами в тильній накладці на тильну накладку з: *а* – з радіаторними горизонтальними ребрами; *б* – з вертикальними ребрами; *в* – з циліндричними ребрами

Досліджуємо ефективність першого варіанту охолодження ПЕП.

Варіант а - тильна накладка з горизонтальними радіаторними ребрами. Для цього змінимо форму тильної накладки, збільшимо її площу дотику з повітрям. Таким чином, ми збільшили площу поверхні з 9787 мм^2 до 19450 мм^2, майже в два рази. Ефективність зменшення максимальної температури становить 15%

Варіант *б* – тильна накладка з вертикальними ребрами. Збільшення площі поверхні становить 17876.80 мм^2. Ефективність зниження максимальної температури – до 15%.

Варіант *в* – тильна накладка з циліндричними ребрами. Збільшена площа поверхні становить 15404.80 мм^2. Такий варіант цікавий для перетворювача, що працює в даному положенні, адже поверхня тильної накладки нагріває повітря в прорізях, і завдяки конвекції тепле повітря з меншими перешкодами переноситься у верхні шари. Ефективність зниження максимальної температури –25%.

2) Теплорозсіючі вставки.

Як вже було згадано, додаткові центральні накладки, або маси з алюмінію, наприклад, добре відомі і вже достатньо досліджені і з урахуванням теплового поля, і зі зміною характеристик перетворювача (амплітуда, резонансна частота).

Тому немає сенсу ще раз повторювати. А от варіант з однією тонкою мідною вставкою, та іншими модифікаціями мідного прошарку мало досліджений. Але судячи з розрахунків і літературного огляду має бути врахований при виборі способу охолодження перетворювача.

Перший варіант тонка мідна прослойка товщиною 2 мм, з розмірами діаметру відповідними до розмірів п'єзокерамічних кілець (рис.4.3):

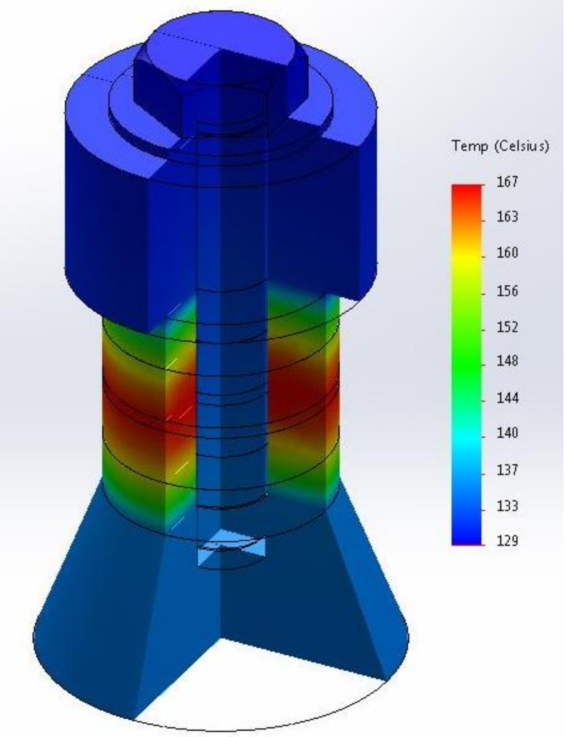


Рис.4.3 Теплове поле ПЕП з мідною прослойкою

Ефективність зниження максимальної температури – 3%.

Для збільшення площі вставки і відводу тепла від центрального нагрітого елементу другому варіанті пропонується використовувати мідну вставку у вигляді циліндричної зігнутої пластини (рис. 4.4):

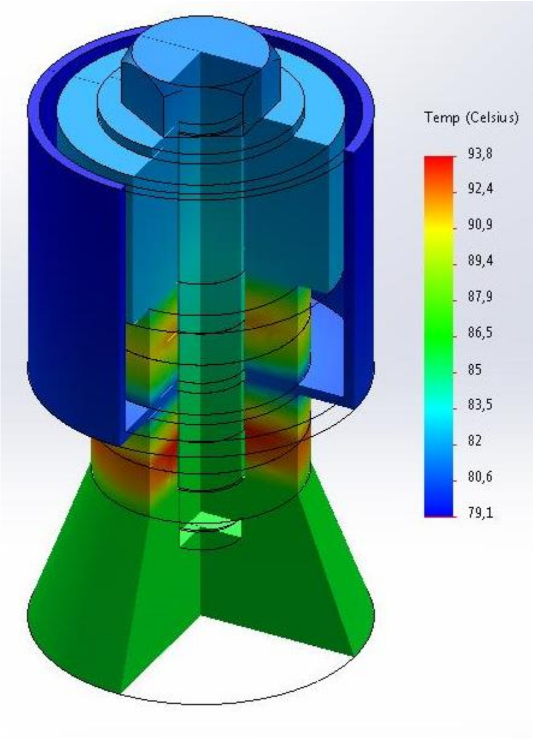


Рис.4.4. Теплове поле ПЕП з мідною прослойкою у вигляді циліндричної зігнутої пластини

Об'єм такої форми вставки V = $23 \cdot 10^{-3}$ $мм^3$. При цьому його ефективність становить 45%. Слід врахувати той факт, що максимальна температура перетворювача (як видно з рисунку) зміщена ближче до тильної накладки.

3) Тепловідвідний слой

Вище ми вже розглядали запропоновані варіанти заповнення корпусу спеціальною сумішшю і замінювали її відомими характеристиками термопасти. Також розглянемо варіант тонкого шару (так як ми говоримо вже про термопасту, то її рекомендую наносити шаром до 3 мм) навкруги активного елементу (рис.4.5). Такий варіант важко з прогнозувати, так як існує безліч різних виробників термопаст та всі вони різні за своєю структурою: однорідність, пластичність, час застигання, повне застигання до майже твердого стану, чи вона залишається більше рідкою. Та майже неможливо оцінити іі реакцію на коливання, але якщо більшою складовою її все ж таки має бути каучук, то такі випадки існують в практиці використання п'єзокерамічних перетворювачів різних типів (в циліндричних також.

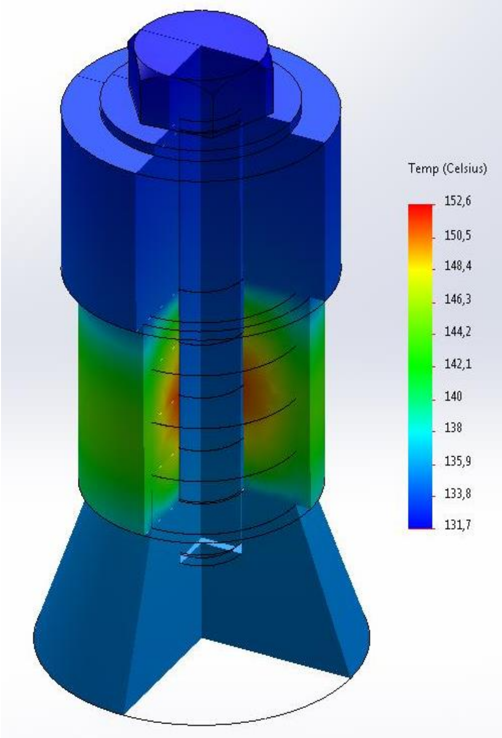


Рис.4.5. Теплове поле перетворювача з тепловідводящим шаром термопасти

Представимо діаграму ефективності зменшення максимальної температури нагріву стержневого перетворювача, застосовуючи пасивні методи охолодження (рис. 4.6):

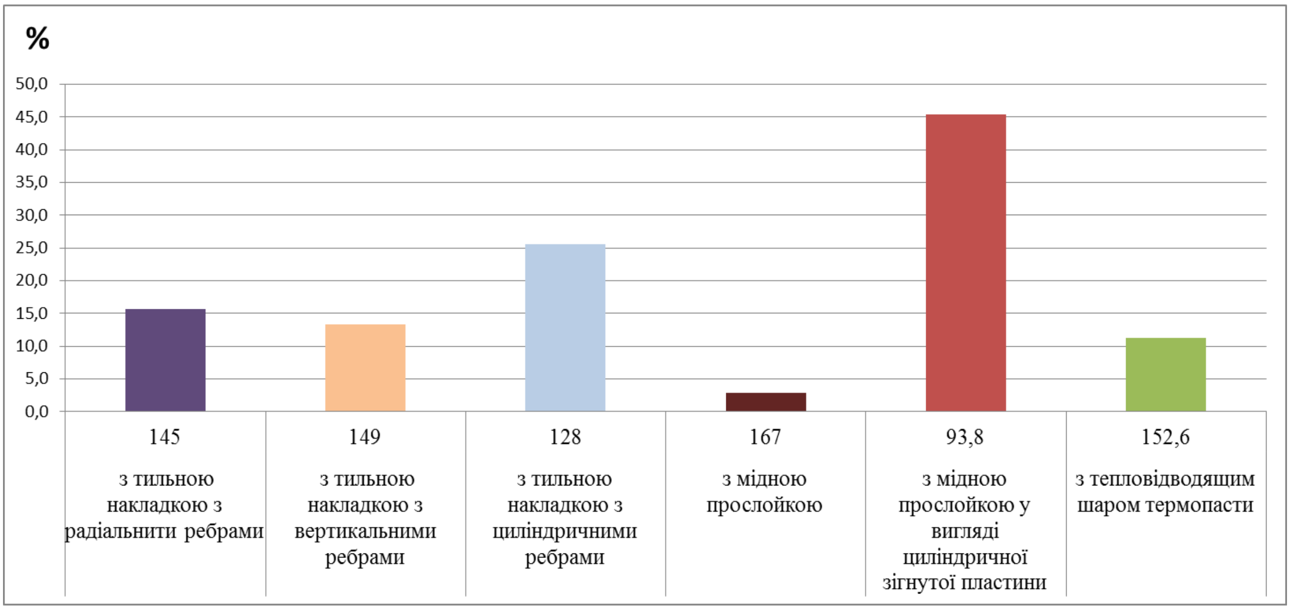


Рис.4.6. Діаграма ефективності пасивних методів охолодження

При зміні форми тильної накладки на накладку з радіаторними ребрами ефективність тепловідводу не збільшується пропорційно збільшенню площі поверхні. За рахунок великої площі контакту з оточуючим середовищем, високої теплопровідності і вдалого розташування між кільцями п’єзокераміки, в мідної прослойки у вигляді циліндричної зігнутої пластини найвища ефективність.

4.3.3 З урахуванням корпусу перетворювача

Доповнення корпусом досліджуваного стержневого ПЕП дозволить врахувати ці два додаткові елементи, які є в конструкціях реальних перетворювачів. Введення додаткових елементів конструкції призводить до зміни теплового поля всього ПЕП, що обов’язково має бути враховано під час конструювання. Досліджень температури перетворювача в корпусі вкрай мало. В той час, навіть кріпленням корпусу важливо не нехтувати, при розрахунку сумарних втрат перетворювача [21].

Наступні результати дослідження були опубліковані в [2].

Корпус слугує для зручності використання пристрою та для механічного захисту елементів конструкції перетворювача, таких як п'єзокераміка, електричні з'єднання. Навіть при наявності в корпусі великого об'єму повітря проблема нагрівання залишається. А також при наявності корпусу відкриваються нові варіанти охолодження, наприклад необхідно також оцінити можливості природної конвекції.

Дослідження проводилось методом моделювання в середовищі SolidWorks в додатку Flow Simulation. Аналітичний розрахунок є складним для врахування корпусу, через неможливість заміни об’єму порожнини в корпусі нескінченним шаром.

Для вирішення поставлених задач в SolidWorks були створені компоненти ПЕП та назначені їм матеріали. В Flow Simulation був заданий зовнішній тип аналізу, теплопровідність, сила тяжіння, охолоджуючі речовини – повітря, газ, електроізоляційна рідина, початкові умови (тиск 101325 Па та температура 25 °С), оточуюче середовище - повітря.

В цьому підрозділі проведено дослідження впливу корпусу на температурне поле ПЕП типу Ланжевена методом кінцевих елементів, за допомогою моделювання в SolidWorks. Показано результати зменшення температури таких методів охолодження:

– заповнення порожнини корпусу електроізоляційною рідиною, газом, сумішшю термопасти;

– використання отворів в корпусі;

– зміна форми тильної накладки на таку, що має радіаторні бокові ребра, вертикальні радіаторні ребра, циліндричні радіаторні ребра;

– теплорозсіючий шар;

– використання активного охолодження повітрям з трьома різними швидкостями.

1) Порівняємо температурні поля ПЕП без корпусу (рис.4.7, *а*) та з ним (рис.4.7, *б*). Корпус заповнено повітрям, як і оточуюче середовище. Для більшої зручності покажемо розподіл температури на однаковій кольоровій шкалі.

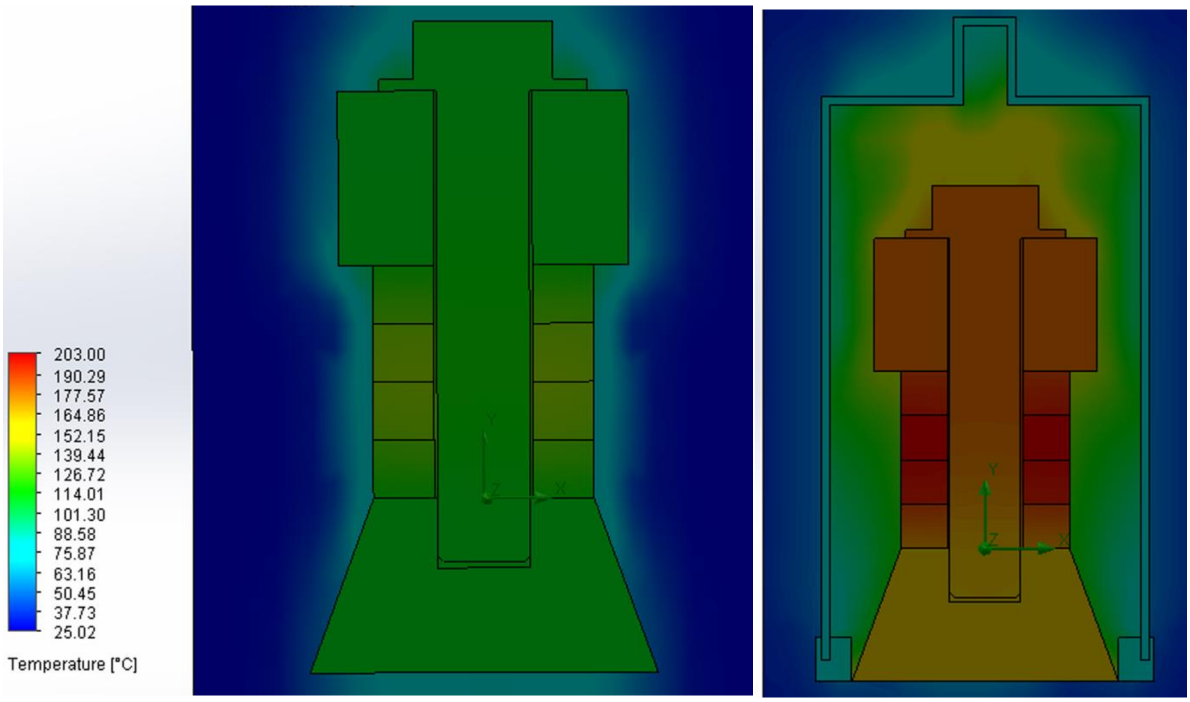


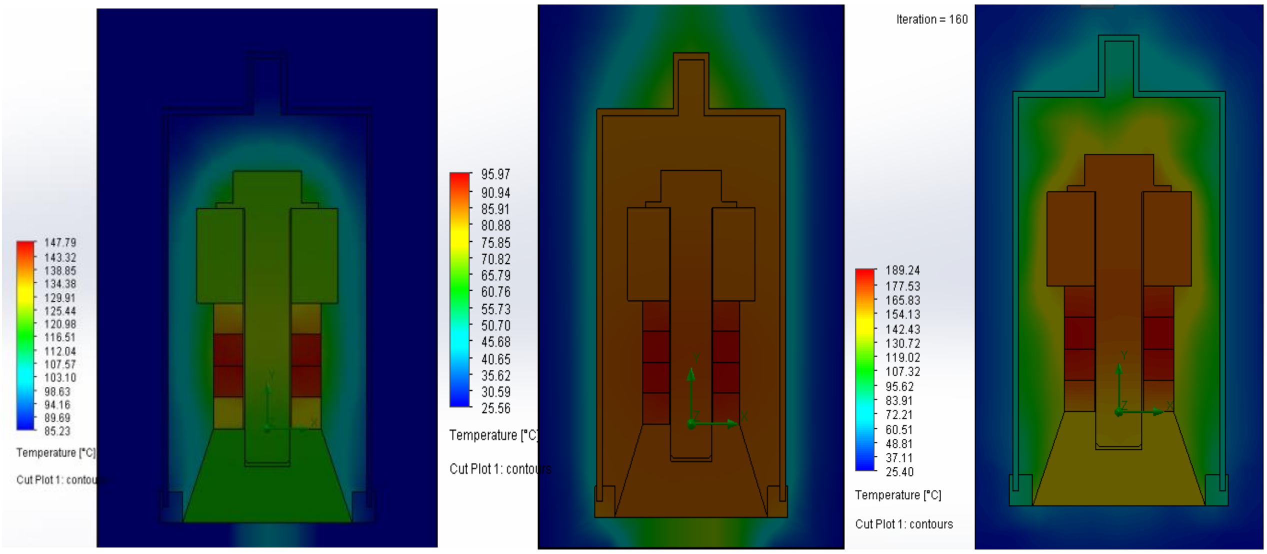
Рис.4.7. Теплове поле п'єзокерамічного електроакустичного перетворювача: *а* – без урахування корпусу; *б* – з урахуванням корпусу

На рис.4.7**,** *а* максимальна температура п'єзокераміки 140 °С, що входить в рамки робочої температури для даного типу, але виходить за межі нормального теплового режиму. Додавання корпусу збільшило температуру на 64 °С, що неможливо не враховувати при конструюванні перетворювача.

З результатом на рис. 4.7 *б*, будемо порівнювати усі наступні досліджені варіанти.

2) Заповнення порожнини корпусу.

Вище по розділу вже було проаналізовано варіанти заповнення корпусу, тому одразу покажемо результати:



а) *б)* *в)*

Рис. 4.8. Корпус заповнений: *а* - електроізоляційної рідиною; *б* – термопастой; *в* - неоном

Найпопулярніше заповнення – електроізоляційна рідина, дозволила знизити максимальну температуру на 56 °С. При заповненні повністю корпусу термопастою максимальна температура знизилась на 108 °С. В залежності від типу корпусу, форми накладок та необхідності охолодження, можливо заповнювати частково, а не повністю порожнину корпусу. При заповненні неоном, максимальна температура стала на 14 °С менша.

Ефективність використання різного заповнення герметичного корпусу: корпус заповнений електроізоляційною рідиною – 27,5 %, заповнений сумішшю термопасти – 53 %, заповнений неоном – 6,8 %.

3) Корпус з отворами.

При належних умовах експлуатації в корпусі допускається робити вентиляційні отвори. Тепер розглянемо як впливає перфорація в корпусі на теплове поле. Але до того слід зробити уточнення. Якщо подивитися на конвекційні потоки повітря в моделі з закритим корпусом, то стане ясно, що більш ефективно робити отвори в кришці корпусу, так як нагріте повітря мало би можливість виходити з корпусу швидше. Але так як далі ми будемо розглядати примусове охолодження повітрям, то зверху корпусу буде розташовуватися “вентилятор”.

Згідно з фізичним явищем конвекційного потоку, оптимально робити отвори зверху перетворювача, щоб тепле повітря виходило назовні, на рисунку 4.9 можемо перевірити правильність моделювання.

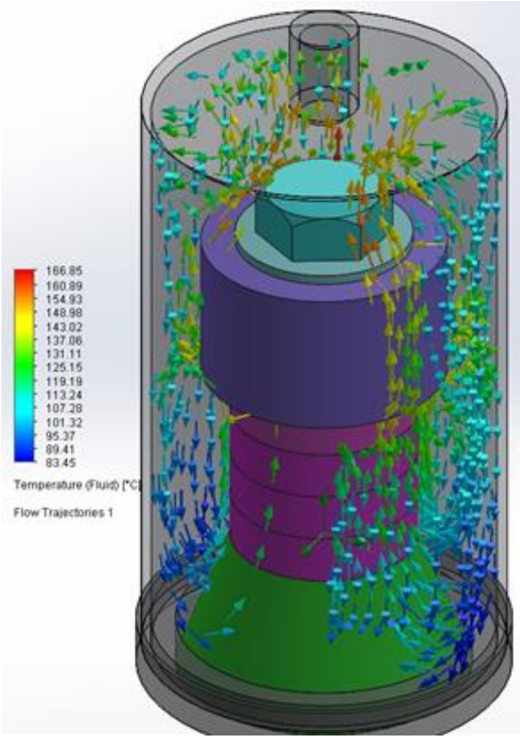
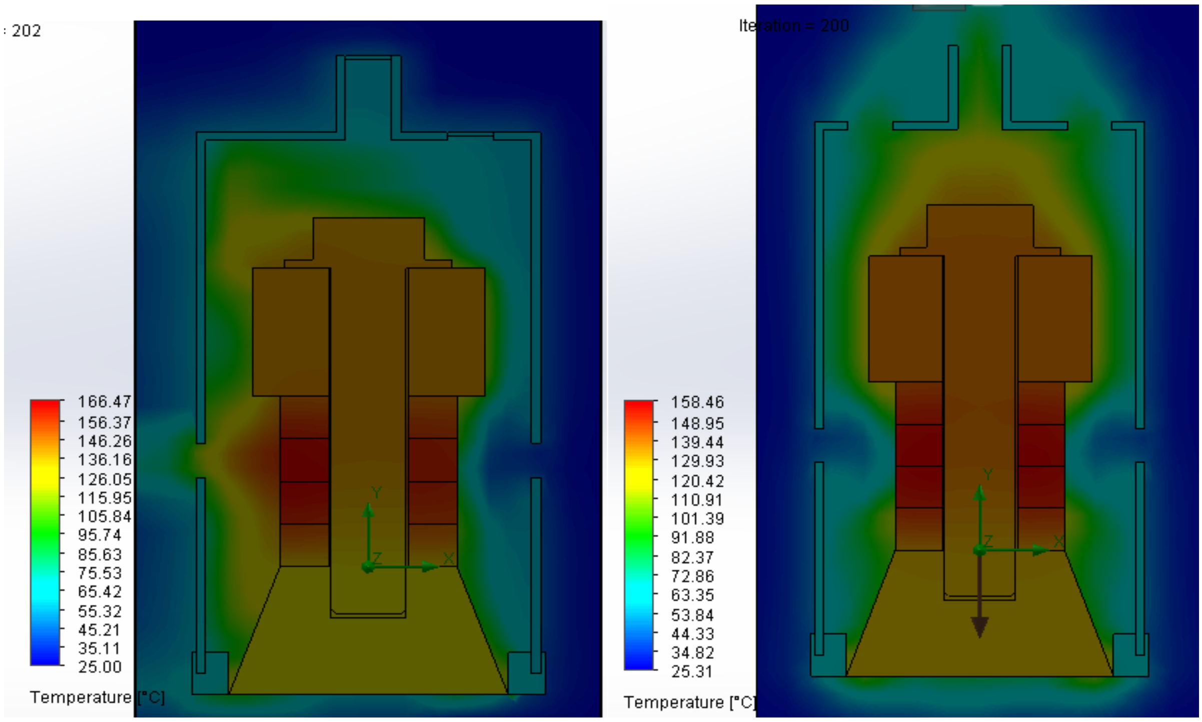


Рис.4.9. Теплові потоки в закритому корпусі перетворювача

Теплові поля перетворювача в корпусі з перфорацією показані на рисунку 4.10. При наявності одного отвору збоку перетворювача, максимальна температура зменшилась на 10 °С, тобто всього приблизно на 5 %. Цікаво, що при збільшенні до 8 отворив, значення температури максимального нагріву майже не змінилися. Але при повороті ПЕП на 90°, тобто коли отвір знаходитиметься зверху, ефективність такого охолодження становитиме 13 %. А при наявності 8 отворів по радіусу корпусу – 18,6 %, тобто холодне повітря до корпусу поступає, а нагріте виходить з корпусу з меншими перешкодами. Таке моделювання в SolidWorks Flow Simulation проходило зміною напрямку сили тяжіння – вздовж осі X.

Представимо на рисунку теплове поле перетворювача з найбільш показовим варіантом, з 8-ма отворами та поворотом перетворювача вправо на 90^0:



а) *б)*

Рис. 4.10. Стержневий перетворювач в корпусі: *а)* - з 8 отворами, сила тяжіння в напрямку вісі X, *б)* – 8 отворів по радіусу корпусу і 8 на кришці

Якщо взяти ситуацію тільки можливості перфорації в корпусі, то на рис. 4.10 б. показана ситуація, коли по радіусу і на кришці перетворювача наявні отвори. Температура максимального нагріву активного елементу зменшилась на 45^{0}C і ефективність становить 22.2%.

4) Зміна форми тильної накладки в замкненому корпусі з повітрям.

Проводились зміни форми тильної накладки аналогічні в підрозділі 4.3.2 , на рисунках 4.2, та 4.3 , тільки з урахуванням закритого корпусу. Такі варіанти охолодження дали ефективність 7,6 % для тильної накладки з радіаторними горизонтальними ребрами, 6,6 % - для накладки з вертикальними радіаторними ребрами та 8 % - для тильної накладки з циліндричними ребрами.

5) Теплорозсіюючий шар.

Додавання теплорозсіючого елементу з міді (рис. 4.11), товщиною 2 мм, зовнішнім та внутрішнім діаметром, рівним відповідним розмірам п’єзоелемента, дало зниження максимальної температури розігріву на 6 %, в порівнянні з закритим корпусом без додакових охолоджуючих елементів.

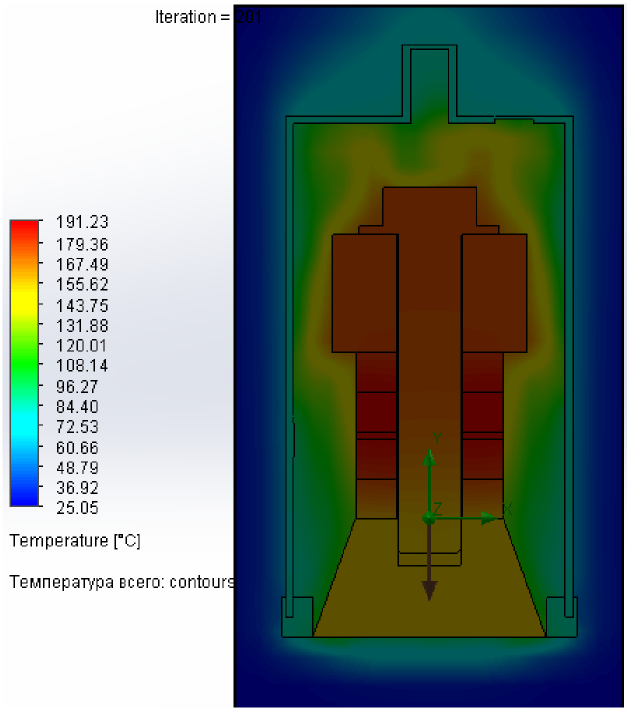


Рис. 4.11. Теплове поле ПЕП в корпусі з теплорозсіючою мідною вставкою.

6) Активне охолодження

Розглянемо типову ситуацію, коли зверху корпусу стоїть компресор або міні вентилятор (сучасні вентилятори мають розмір 2 см^2), а вихідний отвір розташований збоку корпусу. Повітря подається кімнатної температури, з масовою витратою: $37{,}92 \cdot 10^{-5}$ кг/с, $7{,}58 \cdot 10^{-5}$ кг/с, $3{,}792 \cdot 10^{-5}$ кг/с, що відповідає зміні всього об'єму корпусу за 1 с, 5 с та 10 с, відповідно. За допомогою моделювання було з'ясовано, що перший варіант відповідає швидкості повітря на вході в корпус 4,2 м/с, а найповільніший обдув – швидкості 0,42 м/с.

На рисунку 4.12 показано розподіл теплового поля при найшвидшому обдуванні:

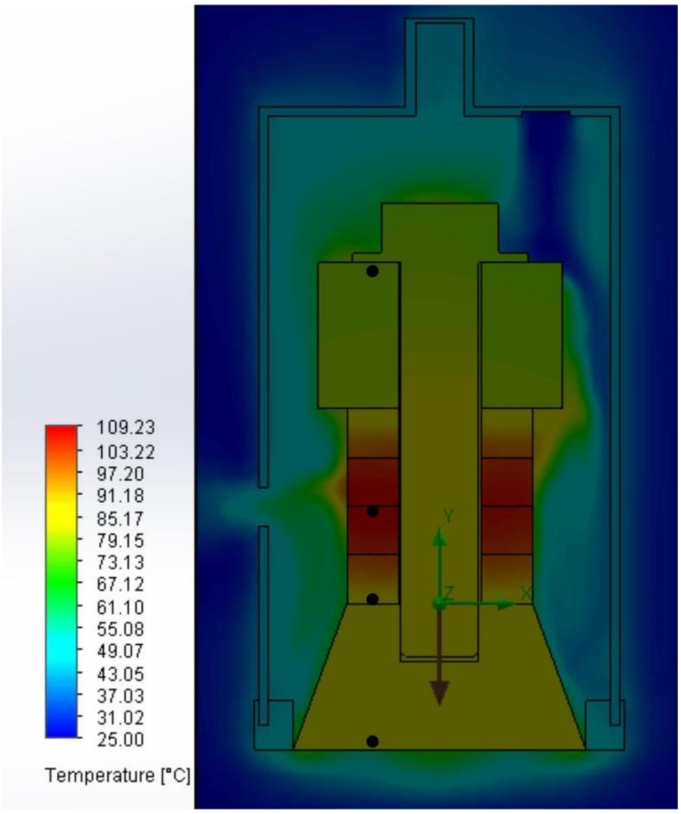


Рис.4.12. Теплове поле п’єзокерамічного електроакустичного перетворювача з активним охолодженням

Ефективність використання активного охолодження з різною масовою витратою:

– при зміні всього об’єму повітря в корпусі за 1 с, максимальна температура нагріву зменшилась на 47 %;

– при зменшенні швидкості обдування в 5 разів, температура зменшилась на 19 %;

– при зменшенні швидкості обдуву в 10 разів – температура зменшилась на 11 %.

7) Доповнимо активне охолодження попередніми варіантами зміни форми тильної накладки.

При використанні найшвидшого обдуву значення ефективності охолодження різні:

– для горизонтальних радіаторних ребер, температура в активному елементі зменшилась на 46 %;

– для тильної накладки з вертикальними ребрами на 50 %;

– для тильної накладки з циліндричними ребрами на 48 %.

При зменшенні масової витрати, форма тильної накладки майже не впливає на ефективність охолодження: зменшення температури становить 20–21 % для обдуву середньої швидкості, та 13–14 %, відповідно, для повільного.

Покажемо графік розподілу температури (рис.4.13) по чотирьом точкам перетворювача (на рис. 4.12 показано чорними точками): на тильній накладці; всередині активного елемента; на межі активного елемента та випромінюючої накладки; на тильній накладці - для найбільш ефективних варіантів охолодження. По вертикальній осі – температура °С.

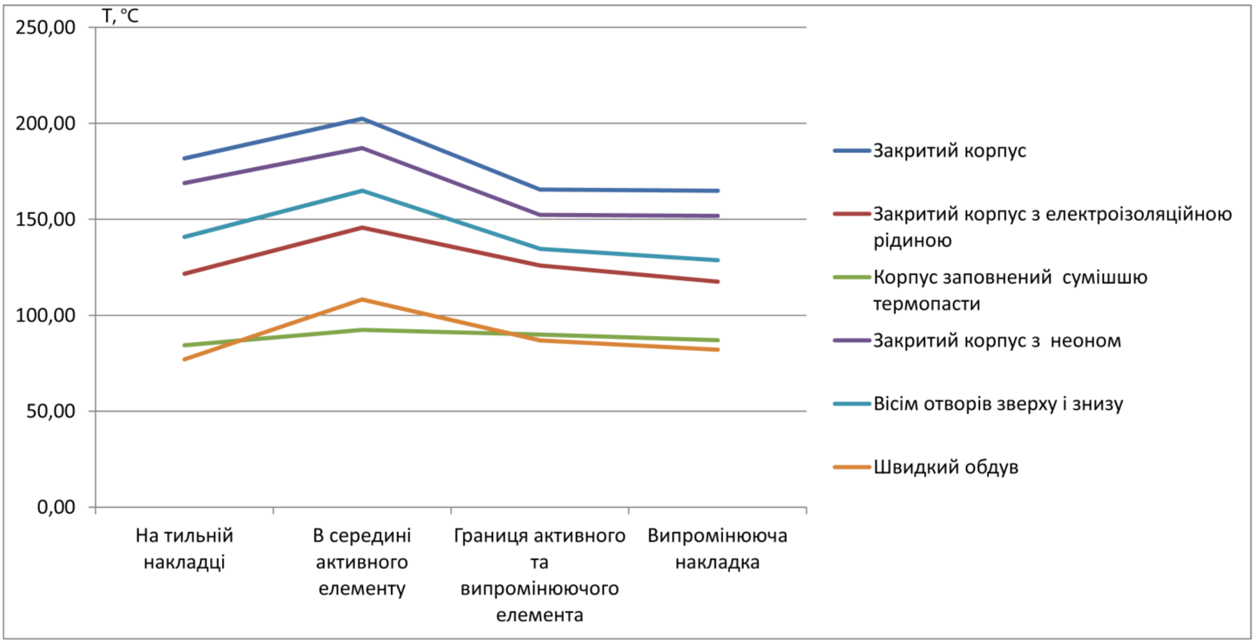


Рис.4.13. Графік розподілу температури в п’єзокерамічному електроакустичному перетворювачі для шести варіантів охолодження

По графіку на рисунку 4.13 можна також отримати інформацію про рівномірність теплового поля. Різкий перепад температури погано впливає на клейові прошарки.

Були змодельовані в SolidWorks теплові поле перетворювача без урахування корпусу та з наявним корпусом. Наявність корпусу збільшує максимальну температуру нагріву п’єзокераміки майже в 1.45 рази. За допомогою моделювання зовнішньої задачі вдалося з’ясувати температуру поза ПЕП, що дає важливе розуміння температури робочого середовища і корпусу.

Було запропоновано такі варіанти охолодження п’єзокерамічного електроакустичного перетворювача типу Ланжевена: заповнення порожнини корпусу електроізоляційною рідиною, газом, сумішшю термопасти; використання отворів в корпусі; зміна форми тильної накладки на таку, що має радіаторні ребра: бокові, вертикальні, циліндричні; теплорозсіючий шар; використання активного охолодження повітрям з трьома різними швидкостями.

За допомогою моделювання в SolidWorks Flow Simulation були отримані наступні результати. Найкращі результати зменшення температури (53%) і рівномірне розподілення температури по всьому перетворювачі дало заповнення корпусу спеціальною сумішшю, але такий варіант досить коштовний та трудомісткий. Також досить добрі результати охолодження показало продування корпусу повітрям (47%) та заповнення корпусу електроізоляційною рідиною (28%)

Бачимо, що раціональне розташування отворів в корпусі (18,6%) дають кращі показники ефективності ніж повільне обдування (11%). Тобто необхідно робити отвори так, щоб холодне повітря мало змогу заходити до корпусу і безперешкодно виходити конвекційними потоками.

Зміна форми тильної накладки при наявності обдуву не дало суттєвого покращення ефективності охолодження. Причиною цього є недоступність потоку повітря, що подається, до найбільш нагрітого елемента – п’єзокераміки. Адже відомо, що коефіцієнт тепловіддачі твердого тіла збільшується зі збільшенням швидкості руху оточуючого середовища. Збільшення зовнішнього радіуса тильної накладки в даному випадку шкодить. При іншому розташуванні потоку (біля активного елементу), показники ефективності зростуть.

Результати досліджень дають можливість обрати оптимальний варіант зменшення температури нагріву п’єзокерамічного електроакустичного перетворювача типу Ланжевена для підвищення ефективності та тривалості його безвідмовної роботи.

4.4. Дослідження додаткового впливу на роботу перетворювача, запропонованих способів охолодження

Наступні викладки та результати дослідження резонансної частоти були опубліковані в [1].

Подальше дослідження методів охолодження стержневого перетворювача стосується зміни резонансної частоти, адже цей параметр важливий при конструюванні перетворювачів. Зауважимо, що болт в даному досліджені не відіграє роль попереднього напруження, він відіграє роль тільки додаткової маси та жорсткості системи для розрахунку резонансної частоти. Тобто не моделюється ситуація вгвинчування в передню накладку. Тому паразитні коливання болта не досліджувались, такі явища описані в [77]. Це окрема, дуже обширна тема, яка тільки віддалено пов'язана з забезпеченням нормального теплового режиму ПЕП.

Раніше експериментально досліджувалося зміна розташування п'єзокерамічних кілець щодо вузлового перетину, при збереженні загальної товщини півхвильового перетворювача. Тобто взаємозамінити товщини обох накладок двонаправленого перетворювача. Для експерименту взяли три моделі перетворювачів. Результати показали значне зниження амплітуди коливань і зміщення резонансної частоти до 10% [12]. Також досліджувались зміни кількості п'єзокерамічних кілець для ультразвукового хірургічного ріжучого апарату. В [87] дослідили варіанти з двома, чотирма та шести кільцями п’єзокераміки і це дає уявлення про компроміси між об'ємом п'єзокерамічного матеріалу, розташування п'єзокерамічних кілець та резонансною частотою і амплітудою вібрації.

Також в [62] раніше було досліджено, зміна тильної накладки, положення і довжина болта та зміна випромінюючої накладки так, що резонансна частота всіх семи перетворювачів була рівна початковій частоті.

Якщо зміну резонансної частоти перетворювача при додаванні тепловідводящої вставки можна вирахувати аналітично [88]. То вираховувати зміну резонансної частоти перетворювача в залежності від форми накладки має складності. Адже для аналітичного розрахунку необхідна тільки площа перерізу, що не дає інформації про форму накладки. Тому для того щоб отримати інформацію про зміщення резонансної частоти в залежності від форми тильної накладки, використаємо метод моделювання.

Також при збільшенні товщини тильної накладки нагадаймо фундаментальне правило для визначення різних осьових розмірів перетворювача воно полягає в тому, що для того, щоб він міг працювати в резонансі, загальна довжина повинна бути рівною половині хвилі, або її повному коефіцієнту [71]. А при зміні діаметру тильної накладки слід пам'ятати, що її діаметр повинен повністю покривати п'єзокерамічні кільця. А також бути не занадто великим, щоб уникнути порушень зсуву та бічних режимів вібрації. В [71] рекомендують, щоб відношення діаметру до чверті хвилі було менше двох.

4.4.1. Аналітичний метод визначення резонансної частоти перетворювача

Для визначення резонансної частоти системи необхідно вирішити трансцендентне рівняння. Визначимо резонансну частоту трьохкомпонентної коливальні системи графічним способом. Співвідношення (4.1) пов'язує резонансні частоти і геометричні розміри через хвильові розміри пасивних накладок і активного елементу [61]:

$$\begin{aligned}&\frac{\rho_1 c_1 S_1}{\rho_2 c_2 S_2} tg\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right)\cdot\frac{\rho_3 c_3 S_3}{\rho_2 c_2 S_2} tg\left(\frac{2\pi l_3}{\lambda_3}\right) tg\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda_2}\right)=\\&=\frac{\rho_1 c_1 S_1}{\rho_2 c_2 S_2} tg\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right)+\frac{\rho_3 c_3 S_3}{\rho_2 c_2 S_2} tg\left(\frac{2\pi l_3}{\lambda_3}\right)+tg\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda_2}\right),\end{aligned} \tag{4.1}$$

де $S_{1,2,3}$ площа поперечного перерізу випромінюючої накладки, активного елементу, тильної накладки; $\rho_{1,2,3}$ - густина матеріалів; $c_{1,2,3}$ - швидкості звуку в матеріалах; $\lambda_{1,2,3}$ - довжина хвилі в матеріалах, l_1 - довжина випромінюючої накладки; l_2 - довжина активного елементу, l_3 - довжина тильної накладки. Для площі поперечного перерізу випромінюючої накладки беремо площу поперечного перерізу по середній лінії усіченого конуса.

Довжина хвилі для кожного матеріалу розраховується за відомим співвідношенням: $\lambda_i = c_i / f_r$.

Згідно, співвідношенню (4.1), резонансна частота перетворювача дорівнює $f_r = 15581$ Гц. Аналогічну частоту було отримано з більш компактного співвідношення (4.2) для розрахунку кругової частоти механічного резонансу [89, 90]:

$$\frac{\omega l_2}{c_2} + arctg\left(\frac{\rho_1 S_1 c_1}{\rho_2 S_2 c_2} tg\frac{\omega l_1}{c_1}\right) + arctg\left(\frac{\rho_3 S_3 c_3}{\rho_2 S_2 c_2} tg\frac{\omega l_3}{c_3}\right) = \pi, \quad (4.2)$$

де ω - кругова резонансна частота механічного резонансну п'єзоелектричного випромінювача.

4.4.2 Визначення резонансної частоти перетворювача за допомогою комп'ютерного моделювання

Для експерименту було обрано моделювання резонансної частоти системи в програмі SolidWorks Simulation. Модальний аналіз знаходить власні частоти і форми коливань, припускаючи, що тіло не піддається зовнішньому збудженню та відсутнє демпфірування [91].

1. Спрощена модель перетворювача

Для підтвердження сумісності результатів розрахунків і моделювання, порівняємо резонансну частоту перетворювача, отриману за допомогою моделювання в програмі SolidWorks з розрахованою аналітичним методом в підрозділі 4.4.1. При цьому, спершу слід взяти найбільш наближений варіант спрощеного перетворювача до розрахункової моделі. Для цього залишимо тільки найбільш конструктивно важливі елементи: випромінюючу накладку, активний елемент, тильну накладку з отворами під стягуючий болт.

Графік деформацій показаний на рисунку 4.14. Врахуємо, що значення на кольоровій легенді (color legend) в результатах зміщення модального аналізу не мають кількісного сенсу, їх можна оцінювати тільки відносно один одного для досліджуваних точок в одній моді коливань й одного аналізу.

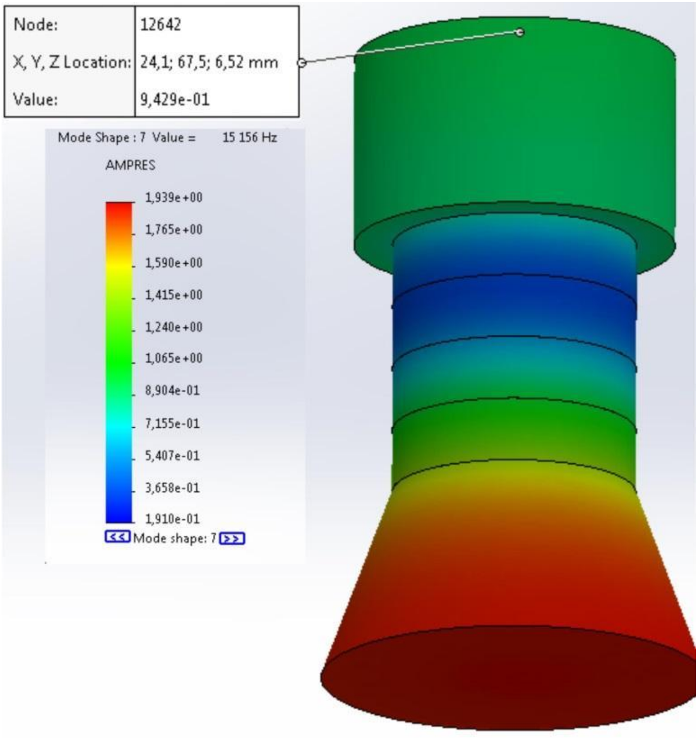


Рис. 4.14. Частотний аналіз перетворювача

На малюнку показана рівномірність зсувів в поздовжньому напрямку, тим самим підтверджуючи правильність обраної моди коливання. Максимальний відносний зсув на випромінюючій накладці 1.939 / 0.191 = 10.15, на тильній накладці 0.943 / 0.191 = 4. Тильна важка накладка зміщена менше, ніж випромінююча легка накладка. Власна частота такої конструкції f_{SW1} = 15.2 кГц, вага 836.11 грам.

2. Моделювання власної частоти коливання перетворювача з армуючим елементом.

При додаванні в модель перетворювача стягуючого болта і ущільнюючої шайби (рис.4.15), резонансна частота системи зростає до f_{SW2} = 16.3 кГц, а загальна вага стала 1022.19 грам.

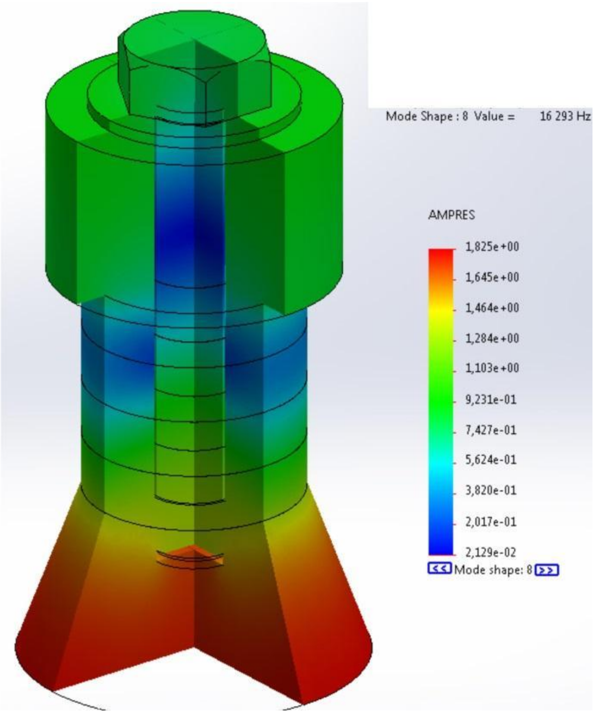


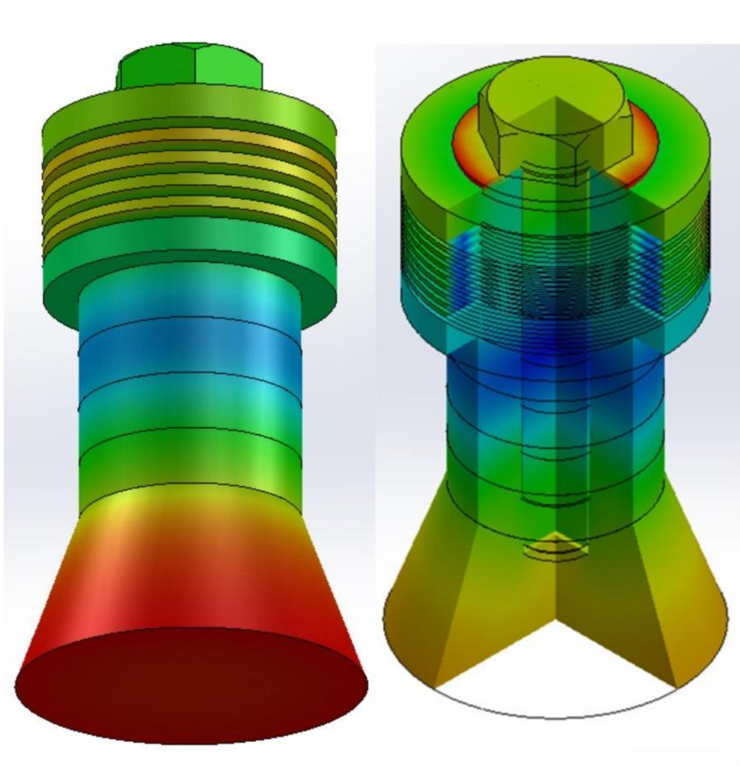
Рис. 4.15. Частотний аналіз перетворювача з армуючим елементом

4.4.3 Визначення резонансної частоти перетворювача з пасивним охолодженням за допомогою комп'ютерного моделювання

Спершу розглянемо варіанти зі зміною форми тильної накладки.

1) Зміна форми тильної накладки на накладку з радіаторними горизонтальними ребрами.

На рисунку 4.16 показаний перетворювач з тильної накладкою з радіаторними горизонтальними ребрами, зовнішній діаметр 54 мм, внутрішній 17 мм, зі збереженням маси 411.42 грам (рис. 4.15 *а*.) та 414.82 грам (рис.4.15 *б*.).



а) *б)*

Рис.4.16. Частотний аналіз перетворювача з тильної накладкою: *а)* - з горизонтальними радіаторними ребрами, *б)* - горизонтальними радіаторними тонкими і густими ребрами

В результаті отримана резонансна частота 16112 Гц, що дуже несподівано. На графіку бачимо, що ребра зміщуються нерівномірно. Раніше передбачалося, що така зміна форми тильної накладки не впливає на резонансну частоту. При збільшенні кількості ребер (рис.4.16 б), відповідно товщина кожного буде тонше, резонансна частота системи стала 16732 Гц, система також не вібрує як єдине ціле.

Це явище пояснюється тим, що розглядаються поздовжні коливання. І горизонтальні ребра вібрують з окремою частотою, створюючи додаткове зміщення резонансної частоти всієї системи. Для використання даної зміни форми накладки необхідно зменшувати глибину ребер, або використовувати інші моди коливань.

Також було проведено моделювання подібною зміною тильній накладки, але зі збереженням габаритних розмірів - результат також незадовільний. Частота зросла майже на 8%, а ребра все ще зміщуються нерівномірно.

2) Зміна форми тильної накладки на накладку з вертикальними радіаторними ребрами з збереженням маси.

На рисунку 4.17 представлений перетворювач з тильною накладкою, зовнішній діаметр 53 мм, внутрішній 17 мм. Маса 410.4 грам, підібрана максимально наближеною до початкової.

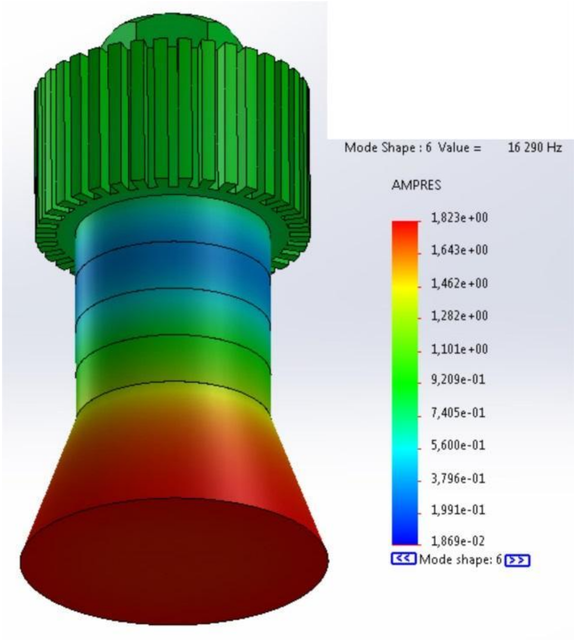


Рис. 4.17. Частотний аналіз перетворювача з тильної накладкою з вертикальними радіаторними ребрами, зі збереженням маси

В результаті, на поздовжній моді коливань отримали резонансну частоту 16290 Гц, що відрізняється від частоти перетворювача з циліндричною формою тильної накладки на 3 Гц або в 0,018%.

За рахунок зміни діаметра накладки і глибини ребер, проаналізовано 9 варіантів збереження маси і товщини тильній накладки. Результати представимо на рисунку 4.18: графік відносного зміщення частоти перетворювача. По осі абсцис - відносне збільшення діаметра, по осі ординат - проценти.

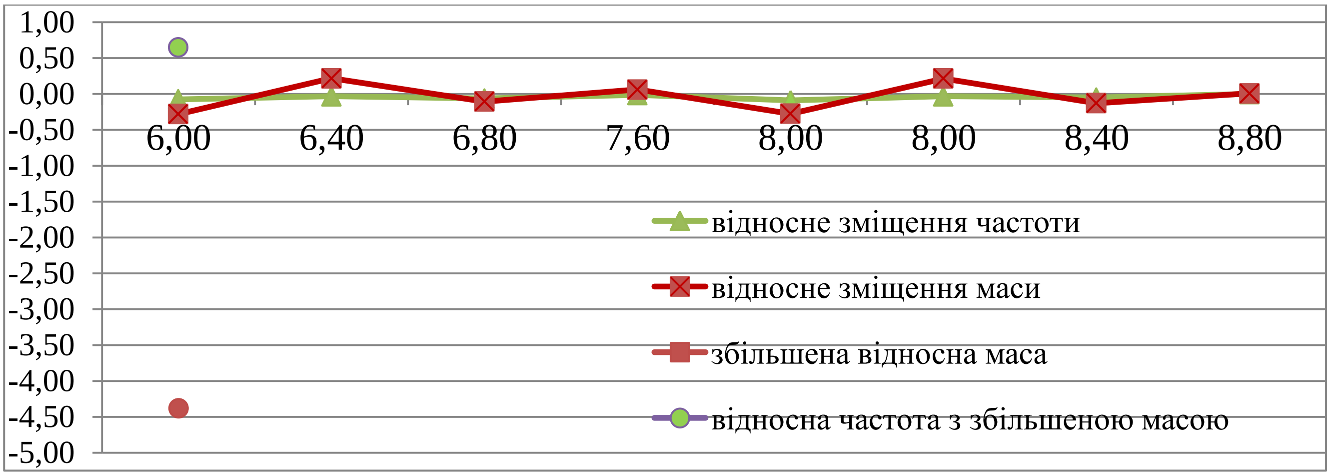


Рис. 4.18. Графік зміщення частоти перетворювача в залежності від діаметра тильної накладки, зі збереженням її маси

Маркерами з кружечками позначено варіант зміни накладки зі зменшенням маси в 4.5%.

3) Зміна форми тильної накладки на накладку з вертикальними радіаторними ребрами з збереженням габаритних розмірів.

Перетворювач з вертикальними радіаторними ребрами, при однаковому зовнішньому розмірі тильної накладки з початковим варіантом, діаметр 50 мм, товщина 30 мм дав резонансну частоту коливальної системи 16701 Гц, при цьому маса накладки 348.35 грам. Залишивши діаметр і товщину тильній накладки без змін, дане додавання радіаторних ребер зменшило масу тильної накладки в 15,4%. Що призвело до збільшення частоти в 2,5%.

4) Зміщення резонансної частоти в залежності від діаметру та товщини тильної накладки.

Далі було проведено більш детальне дослідження, який параметр - зовнішній радіус, товщина або маса тильної накладки з вертикальними ребрами вносить більший вплив на резонансну частоту системи.

На рисунку 4.19 представлено взаємозв'язок резонансної частоти поздовжніх коливань перетворювача від зміни діаметра тильної накладки від початкових 50 мм до 60 мм, при цьому глибина прорізів змінюється відповідно.

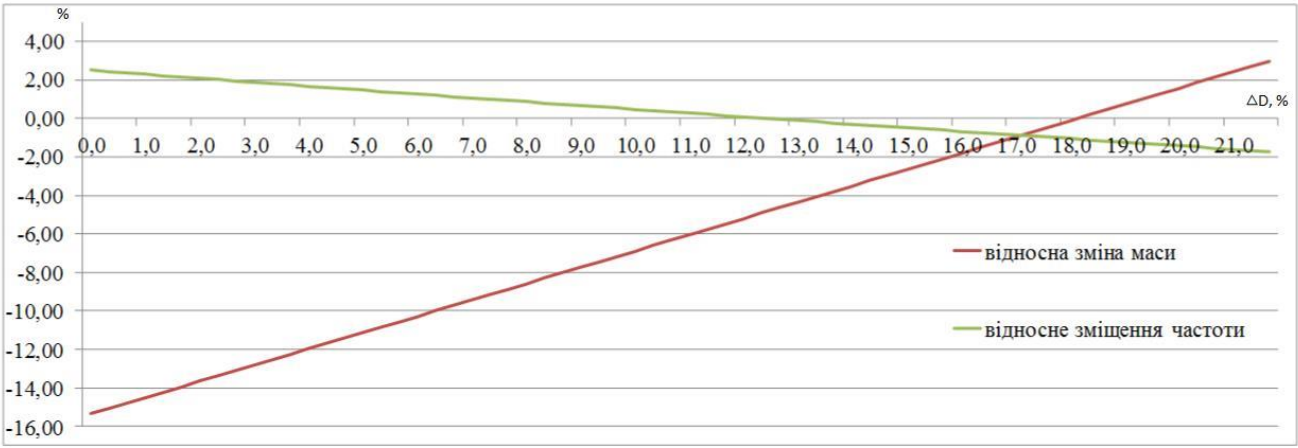


Рис. 4.19. Графік відносних змін частоти, маси, діаметра тильної накладки. По осі абсцис - відносний діаметр, по осі ординат - відсотки

На рисунку 4.20 представлено взаємозв'язок резонансної частоти поздовжніх коливань перетворювача від зміни товщини тильної накладки від початкових 30 мм до 38,5 мм.

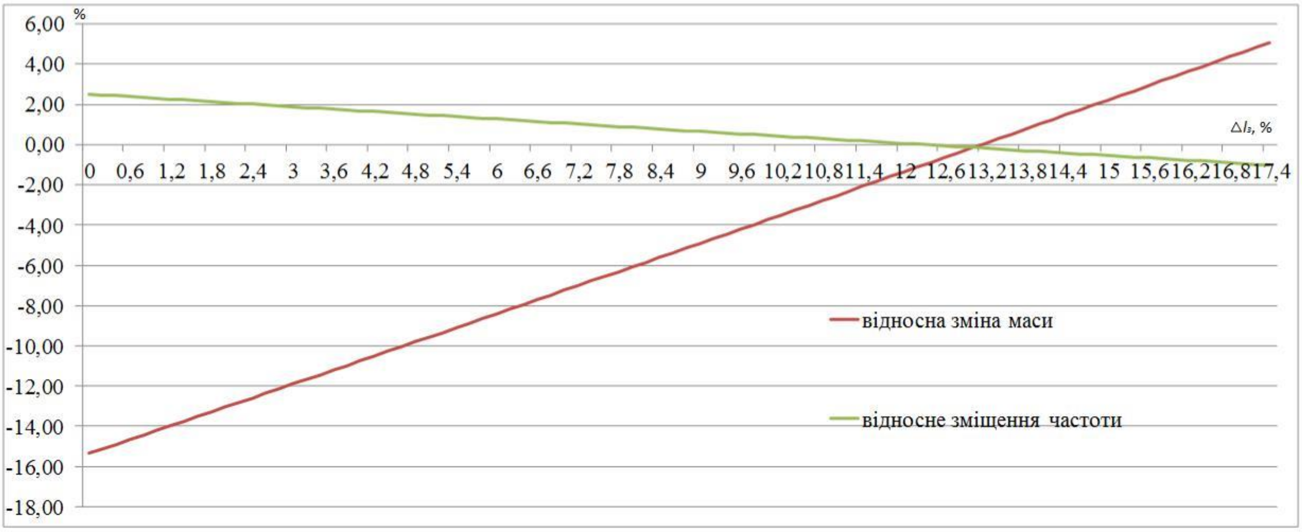


Рис. 4.20. Графік відносних змін частоти, маси, товщини тильної накладки. По осі абсцис – відносна товщина, по осі ординат – відсотки

5) При додаванні мідної прослойки (рис. 4.3) резонансна частота становить 16056 Гц.

Цікаво, що резонансна частота при додаванні вставки зігнутої циліндрично, наче стакан (рис. 4.4), майже не змінилась від попереднього варіанту – 16099 Гц. Очікувалось, що основа вставки,що виступає з п'єзокераміки буде окремо вібрувати, як сталось з тильною накладкою з горизонтальними радіаторними ребрами. Але циліндрична перпендикулярна пластина виступає в ролі ребра жорсткості і не додає окремих поздовжніх коливань.

Додавання корпусу не розглядається в даній роботі. Корпус кріпиться через еластичну розв'язку і не впливає на робочу частоту перетворювача. Корпус надає демпфуючий вплив коливальну систему, зменшуючи її добротність. Оскільки ні збудження, ні затухання не моделюються в програмі, тому ми не може проаналізувати вплив корпусу на резонансну частоту і загасання коливань.

Зауважимо, що представлені зміни тильній накладки ефективні на зниження максимальної температур нагрівання перетворювача, за рахунок збільшення площі поверхні тепловідводу. Тому для вибору найбільш прийнятної зміни форми тильної накладки, слід підбирати форму виходячи з допустимого зміщення резонансної частоти і максимального збільшення площі поверхні.

При додаванні радіаторних ребер і залишивши габаритні розміри тильної накладки початковими, маса системи зменшується, що призводить до збільшення резонансної частоти.

Якщо необхідно чітка сталість резонансної частоти, слід робити зміни тильної накладки за рахунок габаритних розмірів. При допустимому відхилення резонансної частоти не більше 0,01%, можлива зміна маси тильної накладки не більше ніж в 0,03%.

Щоб компенсувати масу коливальні системи за рахунок збільшення діаметра тильній накладки, треба було збільшити його в майже 13,2%. В цьому випадку частота зменшилася в 0,18%.

Щоб компенсувати масу коливальні системи за рахунок збільшення товщини накладки, треба було збільшити її майже на 18%. В такому випадку частота знизилася в (0,12-0,16)%.

Можна зробити висновок, що зміна товщини і діаметра тильної накладки впливає на резонансну частоту набагато менше, ніж зміна маси.

Висновки до розділу

Зменшення температури максимального нагріву перетворювача – важливий конструкторський етап, який забезпечує нормальний тепловий режим перетворювача. До зменшення нагріву входять правильний підбір матеріалів, вибір режимів роботи, а також може застосовуватись пасивне та активне охолодження.

Методи охолодження необхідно обирати в залежності від бажаної ефективності зменшення температури, умов роботи перетворювача та можливостей зміни параметрів перетворювача.

Для стержневого перетворювача, що працює без корпуса найкращі результати охолодження показало внесення мідної циліндричної вставки. Для перетворювача, що працює в корпусі – заповнення корпусу сумішшю схожою на термопасту та застосування активного охолодження.

ВИСНОВКИ

Було проведено літературний огляд, в ході якого виявлено, що теплові навантаження найбільше серед експлуатаційних впливають на роботу п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів. Особливо до негативних наслідків нагріву схильні стержневі перетворювачі, через особливості конструкцій та галузі застосування. Описані випадки надмірного теплового навантаження серед циліндричних перетворювачів.

Були розроблені методики для аналізу теплових полів стержневих перетворювачів, що мають 2 накладки та активний елемент. Та удосконалена методика для циліндричних конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів, що складаються з п’яти шарів матеріалу, один з яких – активний. Результати аналітичного розрахунку та моделювання теплових полів розрізняються для стержневого перетворювача в 1% для максимального значення температури активного елементу, та (15-18)% для температури торцевих стінок накладок. Для циліндричного в (2.2-4.1)% між моделюванням та аналітичним розрахунком теплового поля. Результати експериментального вимірювання температури стержневого перетворювача та моделювання розрізняються для максимальної температури активного елементу 2.2%, для накладок (7-13.3)%.

Розроблені заходи для захисту перетворювачів від перегріву. Ефективність використання конструкторських засобів зменшення температури розігріву стержневого перетворювача становить:зміна форми тильної накладки (13-26)%, тонка мідна вставка – 3%, мідна прослойка у вигляді циліндричної зігнутої пластини 46%, з тепловідводящим шаром термопасти – 11%.

Наявність корпусу збільшує максимальну температуру нагріву п’єзокераміки майже в 1.45 рази. Ефективність використання конструкторських засобів зменшення температури розігріву стержневого перетворювача, з урахування корпусу становить: корпус з електроізоляційною рідиною – 28%, корпус заповнений сумішшю термопасти – 54,4%, корпус з неоном – 7,6%, перфорація корпусу – 22,2%, активне охолодження – 46,5%.

Досліджено вплив пасивних методів забезпечення нормального теплового режиму ПЕП на його резонансні характеристики. Зміна товщини і діаметра тильної накладки впливає на резонансну частоту набагато менше, ніж зміна маси. Якщо необхідно сталість резонансної частоти, слід робити зміни тильній накладки за рахунок габаритних розмірів. При допустимому відхилення резонансної частоти не більше 0,01%, можлива зміна маси тильної накладки не більше ніж в 0,03%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] 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.

[2] L. Perchevska, O. Drozdenko, K. Drozdenko, and O. Leiko, “Study of the influence of the housing on the cooling efficiency of the piezoceramic electroacoustic Langevin-type transducer,” Technol. Audit Prod. Reserv., vol. 3, no. 1(59), pp. 50–55, Jun. 2021,**DOI**: 10.15587/2706-5448.2021.231279.

[3] Л. В. Перчевська, О. І. Дрозденко, К. С. Дрозденко, and О. Г. Лейко, “Забезпечення теплового режиму роботи стержневих конструкцій п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів,” *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, vol. 24, no. 5, pp. 56–63, Oct. 2019, **DOI:** 10.20535/2523-4455.2019.24.5.190452.

[4] A. C. Mathieson, “Nonlinear Characterisation Of Power Ultrasonic Devices Used In Bone Surgery” , PhD thesis, University of Glasgow 2012 . [Online]. Available http://theses.gla.ac.uk/3135/

[5] A. R.-M. O. Kalisz , M. Gerkowicz, T. Wolski, K. Gozdziuk, P. Baranowski, W. Mazurek, “Thermographic evaluation of healing process on patients after surgery of cataract with the use of facoemulsyphication”, *in 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Krakow, 2008.**DOI**: 10.21611/qirt.2008.03_04_17.

[6] S. I. Kosuba and S. V. Skicuk, “The effectiveness of pre-cooling the irrigation solution for cataract phacoemulsification”, *Ophthalmol. J.,* vol. 5, pp. 27–28, 2008.

[7] Б.М. Азнабаев, *Ультразвуковая хирургия катаракты – факоэмульсификация*, Москва: Август Борг., 2005, ISBN: 5-901053-21-4.

[8] I. Kartashev, T. Vontz, and H. Florian, "Regimes of piezoelectric transformer operation", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 8, pp. 2150–2158, Aug. 2006.**DOI**: 10.1088/0957-0233/17/8/014.

[9] S. Sherrit et al., "Characterization of transducers and resonators under high drive levels", *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, vol. 2, pp. 1097–1100, 2001.**DOI**: 10.1109/ultsym.2001.991910.

[10] В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, Е. В. Ильченко, "Исследование влияния температуры на параметры ультразвуковых колебательных систем", *Polzunovsky Alm.*, vol. 1, pp. 54–58, 2013.

[11] В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, Д. В. Генне, Е. В. Ильченко, "Устройство Контроля Температуры Пьезопреобразователей Ультразвуковых Технологических Аппаратов", *South Sib. Sci. Bull.*, vol. 2 (4), pp. 50–52, 2013.

[12] A. Mathieson, A. Cardoni, N. Cerisola, and M. Lucas, "The influence of piezoceramic stack location on nonlinear behavior of langevin transducers*", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 60, no. 6, pp. 1126–1133, 2013.**DOI**: 10.1109/TUFFC.2013.2675.

[13] A. C. H. Tan and F. S. Hover, "On the influence of transducer heating in underwater ultrasonic thrusters", *in Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010,* August, pp. 1–7.

[14] М. В. Богуш, О. М. Богуш, Э. М. Пикалев, "Анализ температурных напряжений в элементах гидроакустических антенн", *Приборы*, vol. 10, no. 160, pp. 38–42, 2013.

[15] S. W. Gotmare, "Thermal Degradation And Aging Of High Temperature Piezoelectric Ceramics", University of Kentucky Master's Theses, 2008. [Online]. Available: https://uknowledge.uky.edu/gradschool_theses/564.

[16] Ceramic as an Electromechanical Transducer [Online]. Available: https://www.ceramtec-industrial.com/en/materials/piezo-ceramics. Дата доступу

5.09.2021.

[17] M. Umeda, S. Takahashi, Y. Sasaki, K. Nakamura, and S. Ueha, “Vibration stress and temperature dependence of piezoelectric resonators with lead-zirconate-titanate ceramics”, *Electron. Commun. Japan* (Part II Electron., vol. 83, no. 9, pp. 1–7, Sep. 2000.**DOI**: 10.1002/1520-6432(200009)83:9<1::AID-ECJB1>3.0.CO;2-W.

[18] M. Prokic, *Piezoelectric transducers* modeling and characterization, Switzerland: MPI, 2004.

[19] Б. Агранат, *Ультразвуковая технология*, Москва: Металлургия, 1974.

[20] H. Lee, S. Zhang, Y. Bar-Cohen, and S. Sherrit, “High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers”, *Sensors*, vol. 14, no. 8, pp. 14526–14552, Aug. 2014. **PMID**: 25111242.

[21] J. L. Butler, A. L. Butler, S. C. Butler, “Thermal model for piezoelectric transducers (L) ”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132, no. 4, pp. 2161–2164, 2012. **PMID**: 23039410.

[22] S. Takahashi, M. Yamamoto, and Y. Sasaki, “Nonlinear piezoelectric effect in ferroelectric ceramics”, *Japanese J. Appl. Physics*, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap., vol. 37, no. 9 PART B, pp. 5292–5296, 1998. **DOI**: 10.1143/jjap.37.5292.

[23] M. Umeda, K. Nakamura, and S. Ueha, “The measurement of high-power characteristics for a piezoelectric transducer based on the electrical transient response”, *Japanese J. Appl. Physics*, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap., vol. 37, no. 9 PART B, pp. 5322–5325, 1998.**DOI**: 10.1143/jjap.37.5322.

[24] A. González, Á. García, C. Benavente-Peces, and L. Pardo, “Revisiting the Characterization of the Losses in Piezoelectric Materials from Impedance Spectroscopy at Resonance”, *Materials (Basel).*, vol. 9, no. 2, p. 72, Jan. 2016.**DOI**: 10.3390/ma9020072

[25] K. Uchino, “Multilayer Technologies for Piezoceramic Materials,” *in Advanced Piezoelectric Materials*, Elsevier, 2017, pp. 423–451.**DOI**: 10.1016/B978-0-08-102135-4.00011-4.

[26] S. Moharana and S. Bhalla, “Influence of adhesive bond layer on power and energy transduction efficiency of piezo-impedance transducer”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 26, no. 3, pp. 247–259, Feb. 2015.**DOI**: 10.1177/1045389X14523858.

[27] Z. Wu and S. Cochran, “Loss effects on adhesively-bonded multilayer ultrasonic transducers by self-heating”, *Ultrasonics*, vol. 50, no. 4–5, pp. 508–511, 2010. **PMID**: 19942247.

[28] E. G. Lierke, W. Littmann, T. Morita, and T. Hemsel, “Various aspects of the placement of a piezoelectric material in composite actuators, motors, and transducers”, *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 57, no. 41, pp. 933–937, 2010.**DOI**: 10.3938/jkps.57.933.

[29] Б. М. Азнабаев, В. Н. Рамазанов, Т. Р. Мухамадеев, “Способ ультразвуковой факоэмульсификации,” *РФ патент RU 2304947 C2*, Авг. 27, 2007.

[30] R. R. Andrés, V. M. Acosta, M. Lucas, and E. Riera, “Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator”, *Ultrasonics*, vol. 82, pp. 345–356, 2018. **PMID**: 28985624.

[31] A. A. Ruffa, “Cooling Acoustic Transducer With Heat Pipes Statement”, *U. S. Patent 8188638*, May 29, 2012.

[32] V. Loyau, G. Feuillard, and L. P. Tran-Huu-Hue, “Modeling of the temperature increase in ultrasonic transducers”, *Proc.: IEEE Ultrason. Symp.*, vol. 1, pp. 642–645, 2004. **DOI**: 10.1109/ULTSYM.2004.1417806.

[33] Ю. М. Быстров, А. С. Голубев, *Колебательные системы ультразвуковых технологических установок*, Уч. пос., Ленинград: ЛЭТИ, 1984.

[34] K. Uchino, “Manufacturing Methods for Piezoelectric Ceramic Materials”, *in Advanced Piezoelectric Materials,* Elsevier, 2017, pp. 385–421.**DOI**: 10.1016/B978-0-08-102135-4.00010-2.

[35] T. Li, Y. H. Chen, and J. Ma, “Frequency dependence of piezoelectric vibration velocity”, *Sensors and Actuators, A: Physical.,* vol. 138, no. 2, pp. 404–410, 2007.**DOI**: 10.1016/j.sna.2007.05.024.

[36] K. Uchino, “Loss Mechanisms in Piezoelectrics: How to Measure Different Losses Separately”, *in High-Power Piezoelectrics and Loss Mechanisms,* CRC Press, 2001, pp. 237–320.**DOI**:10.1201/9781003087519-9.

[37] S. Lin and J. Xu, “Effect of the Matching Circuit on the Electromechanical Characteristics of Sandwiched Piezoelectric Transducers”, *Sensors,* vol. 17, no. 2, p. 329, Feb. 2017. **PMID**: 28208583.

[38] S. B. Kim, J. H. Park, H. Ahn, D. Liu, and D. J. Kim, “Temperature effects on output power of piezoelectric vibration energy harvesters”, *Microelectronics J.*, vol. 42, no. 8, pp. 988–991, 2011.**DOI**: 10.1016/j.mejo.2011.05.005.

[39] J. Ilg, S. J. Rupitsch, and R. Lerch, “Impedance-Based Temperature Sensing With Piezoceramic Devices”, *IEEE Sens. J.,* vol. 13, no. 6, pp. 2442–2449, Jun. 2013.**DOI**: 10.1109/JSEN.2013.2256121.

[40] F. Baptista, D. Budoya, V. Almeida, and J. Ulson, “An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring”, *Sensors,* vol. 14, no. 1, pp. 1208–1227, Jan. 2014.**DOI**: 10.3390/s140101208.

[41] V. N. Khmelev, R. V. Barsukov, D. V. Genne, A. V. Tsiganyuk, A. V. Shalunov, and D. S. Abramenko, “Coordination of electronic generators with piezoelectric oscillatory systems to improve the efficiency of ultrasonic devices”, *Bull. Tomsk Polytech. Univ.,* vol. 317, no. #4, pp. 139–143, 2010.

[42] V. N. Khmelev, R. V. Barsukov, D. V. Genne, and E. V. Ilchenko, “Piezoelectric

transducers temperature monitoring system in ultrasonic technological devices”, *Eastern-European J*. Enterp. Technol., vol. 6, no. #3(60), pp. 4–7, 2012.

[43] V. T. Rathod, “A Review of Electric Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors, Actuators and Transducers”, *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 169, Feb. 1, 2019.**DOI**: 10.3390/electronics8020169.

[44] А. А. Панич, Е.В.Карюков, С.Н. Свирская, А.В. Скрылев, А.Ю. Малыхин, “Возможность комплексного исследования температурной зависимости электрофизических параметров пьезокерамических материалов”, *в Актуальные Проблемы Пьезоэлектрического Приборостроения: Сборник Трудов VIII Всероссийской Актуальные Проблемы,* Ростов-на-Дону, 2012, с. 27–30.

[45] “Piezoelectric Materials.” [Online]. Available: https://www.piceramic.com/en/products/piezoelectric-materials/#c15066. Дата доступу 14.09.2021.

[46] *An American National Standard: IEEE Standard on Piezoelectricity*, IEEE Trans. Sonics Ultrason., vol. 31, no. 2, pp. 8–10, 1984,**DOI**: 10.1109/T-SU.1984.31464.

[47] X. Liao et al., “Functional Piezocrystal Characterisation under Varying Conditions”, *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 12, pp. 8304–8326, Dec. 2015.**DOI**: 10.3390/ma8125456.

[48] R. Georges Sabat, B. K. Mukherjee, W. Ren, and G. Yang, “Temperature dependence of the complete material coefficients matrix of soft and hard doped piezoelectric lead zirconate titanate ceramics”, *Journal Of Applied Physics*, vol. 101, no. 6, Mar. 2007. **DOI**: 10.1063/1.2560441.

[49] B. K. Mukherjee, W. Ren, S.-F. Liu, A. J. Masys, and G. Yang, “Non-Linear Constitutive Properties of Piezoelectric Ceramics”, *MRS Proc.*, vol. 276, pp. 41-54, Feb. 2001.**DOI**: 10.1557/PROC-276-39.

[50] F. Huang, D.-Y. Zheng, S.-M. Hu, and G.-G. Peng, “The Influence of

Environment Temperature on the Degradation of Lead Zirconate Titanate Ceramic”, *in Proceedings of the 2015 International Conference on Material Science and Applications (Icmsa 2015)*, vol. 3, pp. 723–727.

[51] S. Sherrit and B. K. Mukherjee, “Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers”, *Dielectric and Ferroelectric Reviews,* 16 Nov, 2007. http://arxiv.org/abs/0711.2657.

[52] C. P. Hampton, “Failure Analysis Of A 30khz Ultrasonic Welding Transducer”, M. S. thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.

[53] K. Uchino, *High-Power Piezoelectrics and Loss Mechanisms,* 2nd ed. Elsevier Ltd., 2017. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102135-4.00017-5.

[54] Y. H. Su, Y. P. Liu, D. Vasic, F. Costa, W. J. Wu, and C. K. Lee, “Power enhancement of piezoelectric transformer by adding thermal dissipation layers”, *in ICAST 2013:24th Int. Conf. Adapt. Struct. Technol*., 7-9 October, pp. 239–250.

[55] “Piezoelectric transducer design (preliminary).” [Online]. Available: http://www.ultrasonic-resonators.org/design/transducers/transducer_design.html#langevin_transducer. Дата доступу 09.09.2021.

[56] М. А. Михеев, И. М. Михеева*, Основы теплопередачи*. Изд. второе, Москва: Энергия, 1977.

[57] Ю. В. Дьяченко, М. С. Макаров, М. А. Пахомов, *Теплопередача Часть I Теплопроводность*. Новосибирск: Методическое пособие, 2010.

[58] Т. В. Молодечкина*, Конструирование и технология производства радиоэлектронных средств*. Новополоцк: ПГУ, 2008. **ISBN**: 978-985-418-624-5.

[59] В. Н . Хмелев, С. В. Левин, С. Н. Цыганок, А. Н. Лебедев, “Ультразвуковые колебательные системы большой мощности,” в *Intrnational Workshops and*

Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007, Новосибирск, с. 293-299.

[60] В. Н. Хмелев, И. И. Савин, Р. В. Барсуков, А. Н. Сливин, С. Н. Цыганок, и Е. В. Чипурин, "Разработка малогабаритных многофункциональных технологических ультразвуковых аппаратов", в *Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials*, Эрлагол, Алтай, 2003, с. 217-221.

[61] В. В. Богородский, Л. А. Зубарев, Е. А. Корепин, В. И. Якушев, *Подводные электроакустические преобразователи. Расчет и проектирование*. Ленинград: Судостроение, 1983.

[62] M. Karafi and S. Kamali, "A continuum electro-mechanical model of ultrasonic Langevin transducers to study its frequency response", *Appl. Math. Model.*, vol. 92, pp. 44–62, 2021.**DOI**: 10.1016/j.apm.2020.11.006.

[63] А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щуки, Термодинамика и теплопередача. Москва:Высшая школа, 1975.

[64] L. V. Perchevska, O. I. Drozdenko, K. S. Drozdenko, and O. H. Leiko, "Providing of Rod Piezoceramic Electroacoustic Transducers Thermal Mode Operation", Microsystems, Electron. Acoust., vol. 24, no. 5, pp. 56–63, Oct. 2019.**DOI**: 10.20535/2523-4455.2019.24.5.190452.

[65] O. Drozdenko, K. Drozdenko, O. Leiko, and L. Perchevska, "The Thermal Fields Analysis of Sealed Cylindrical Piezoceramic Electroacoustic Transducers Compensated Construction," in 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2020, pp. 815–819.**DOI**: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088757.

[66] O. Drozdenko, K. Drozdenko, and L. Perchevska, "Features of thermal fields calculation for cylindrical piezoceramic transducers with compensated design", in 2018 IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering

Congress (UKRSYW), pp. 44–47

[67] P. Kurowskia, Thermal Analysis with SolidWorks Simulation 2013. 2013. **ISBN**: 978-1-58503-785-8.

[68] “Сведения о создании сетки”, 2010. [Online]. Available: https://help.solidworks.com. Дата доступу 17.09.2021

[69] C. Miclea et al., “Effect of Temperature on The Main Piezoelectric Parameters of A Soft PZT Ceramic”, Romanian Journal of Information Science and Technology, vol. 10, no. 3, pp. 243–250, 2007.

[70] R. Ramesh, R. K. Kumar, and T. K. V. Kumar, “Heat generation in 1-3 piezoceramic - Polymer composites”, *Electroceramics*, vol. 30, no. 4, pp. 251–257, 2013.**DOI**: 10.1007/s10832-013-9791-2.

[71] A. Abdullah, M. Shahini, and A. Pak, “An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer”, *Journal of Electroceramics*, vol. 22, no. 4, pp. 369–382, 2009. **DOI**: 10.1007/s10832-007-9408-8.

[72] T. J. Scarpa, “Electroacoustic sandwich transducers”, *US patent 3,140,859*, July 14, 1964.

[73] A. J. Robert and J. F. Sheehan, “Electroacoustic Converter,” *US patent 6,434,244 B1*, Aug. 13, 2002.

[74] X. Lu, J. Hu, H. Peng, and Y. Wang, “A new topological structure for the Langevin-type ultrasonic transducer”, *Ultrasonics*, vol. 75, pp. 1–8, Mar. 2017.**DOI**: 10.1016/j.ultras.2016.11.008.

[75] A. A. Vjuginova, “Multifrequency Langevin-Type Ultrasonic Transducer”, *Russ. J. Nondestruct. Test.*, vol. 55, no. 4, pp. 249–254, Apr. 2019. **DOI**: 10.1134/S1061830919040132.

[76] P. Harkness, A. Cardoni, J. Russell, and M. Lucas, “Designing a Hollow Langevin Transducer for Ultrasonic Coring”, *Appl. Mech. Mater.*, vol. 24–25, no. May

2018, pp. 65–70, Jun. 2010. **DOI**: 10.4028/www.scientific.net/AMM.24-25.65.

[77] D. A. DeAngelis, G. W. Schulze, and K. S. Wong, "Optimizing Piezoelectric Stack Preload Bolts in Ultrasonic Transducers", *Phys. Procedia*, vol. 63, pp. 11–20, 2015.**DOI**: 10.1016/j.phpro.2015.03.003.

[78] В. Г. Моисеев, В. А. Кривега, Н. И. Краснянский, "Пьезоэлектрический преобразователь", *SU 1052278 A1*, Нояб. 7, 1983.

[79] B. Nilsson, H. Dahlberg, "High Power Ultrasonic Transducer", *US 6,137,209*, Oct. 24, 2000.

[80] P. Vasiljev, D. Mazeika, and S. Borodinas, "Minimizing heat generation in a piezoelectric Langevin transducer", *IEEE Int. Ultrason. Symp. IUS*, pp. 2714–2717, 2012.**DOI**: 10.1109/ULTSYM.2012.0680.

[81] A. Pak, A. Abdullah, "An Approach to Designing a Dual Frequency Piezoelectric Ultrasonic ", *Journal of Stress Analysis* Vol. 1, No. 2, 2017, pp.43-53.

[82] D. Arata, "Why Ultrasonic Cleaning Systems Fail— And How to Prevent It", 2006. [Online]. Available: https://www.ptonline.com/articles/why-ultrasonic-cleaning-systems-fail-and-how-to-prevent-it. Дата доступу 17.09.2021

[83] A. S. Peshkovsky and S. L. Peshkovsky, "Efficient cooling of piezoelectric transducers", *US patent 9,142,751 B2*, Sep. 22, 2015.

[84] H. Hielscher, "Method And Device For Cooling Ultrasonic Transducers", *US patent 8,004,158 B2*, Aug. 23, 2011.

[85] В. И. Стрелов, Ю. Н. Бендрышев, and В. Г. Косушкин, "Высокоэффективные теплоотводы нового поколения для электронных изделий", *Прикладная физика*, vol. № 5, pp. 86–91, 2016.

[86] J. C. Budd, D. Gekelman, and J. M. White, "Temperature rise of the post and on the root surface during ultrasonic post removal", *Int. Endod. Journal.*, vol. 38, no. 10, pp. 705–711, Oct. 2005.**DOI**: 10.1111/j.1365-2591.2005.01002.x.

[87] X. Li, T. Stritch, and M. Lucas, “Design of Miniature Ultrasonic Surgical Devices”, *IEEE Int. Ultrason. Symp. IUS*, vol. 2019-Octob, no. December, pp. 2641–2644, 2019.**DOI**: 10.1109/ULTSYM.2019.8926096.

[88] А. Е. Варнаков, А. О. Малышевский, В. Н. Хмелев, “Ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь”, *РФ патент RU 2 452 586 C1*, Июнь 10, 2012.

[89] В. Л. Ланин, И. Б. Петухов, “Методика расчета параметров УЗ-преобразователей повышенной частоты”, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 5, pp. 42–46, 2013.

[90] M. Wevers, I. Chilibon, and J. P. Lafaut, “Ultrasound underwater transducer for extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) ”, *Romanian Reports in Physics*, Vol. 57, No. 4, P. 979–992, 2005.

[91] P. Kurowskia, Vibration Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2015. *SDC Publications*, 2015. **ISBN**-13: 978-1-58503-938-8.

ДОДАТОК 1

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Перший проректор КПІ ім. Ігоря Сікорського
академік НАН України,
д.т.н., проф. Юрій ЯКИМЕНКО
____
Вихідний № ____________
від «____» ____________ 2021 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
аспірантки кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» Перчевської Людмили Вадимівни у навчальному процесі

Ми, що нижче підписалися, декан факультету електроніки КПІ ім. І. Сікорського д.т.н., проф. Жуйков В.Я., зав. кафедрою акустичних та мультимедійних електронних систем д.т.н., проф. Найда С.А., к.т.н., доц. Дрозденко О.І., склали цей Акт про те, що результати дисертаційної роботи Перчевської Л.В. «Забезпечення теплової міцності конструкцій потужних п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів» впроваджені у навчальний процес кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем (АМЕС), а саме:

1) в дисципліні «Основи конструювання в електроніці» відображені методики аналізу та результати досліджень при розв’язанні задачі знаходження теплових полів, лекція «Врахування впливу теплових факторів на функціонування електронної апаратури»
2) в дисципліні «Конструювання акустичних приладів та систем» відображені методики знаходження теплових полів для стрижневих електроакустичних перетворювачів, а також використовується тривимірна модель перетворювача, лабораторна робота «Дослідження частотних та теплових властивостей стрижневого перетворювача».

Декан факультету електроніки, д.т.н., проф. Валерій ЖУЙКОВ

Завідувач кафедри АМЕС, д.т.н., проф. Сергій НАЙДА

Доцент кафедри АМЕС, к.т.н., доц. Олександр ДРОЗДЕНКО

ДОДАТОК 2

Таблиця значень для рис. 4.20

высота	30,0	30,1	30,2	30,3	30,4	30,5	30,6	30,7	30,8	30,9	31,0	31,1	31,2	31,3
масса	348,35	349,51	350,67	351,83	352,99	354,15	355,32	356,48	357,64	358,80	359,96	361,12	362,28	363,44
частота	16701	16689	16678	16667	16655	16643	16632	16621	16610	16599	16587	16576	16565	16554
площадь	17877	17927	17976	18026	18076	18126	18176	18225	18275	18325	18375	18425	18474	18524

относительное удлинение	30,0	0,0	0,3	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3
относительное смещение массы	411,55	-15,36	-15,07	-14,79	-14,51	-14,23	-13,95	-13,66	-13,38	-13,10	-12,82	-12,54	-12,25	-11,97	-11,69
относительное смещение частоты	16293,00	2,50	2,43	2,36	2,30	2,22	2,15	2,08	2,01	1,95	1,88	1,80	1,74	1,67	1,60

31,4	31,5	31,6	31,7	31,8	31,9	32,0	32,1	32,2	32,3	32,4	32,5	32,6	32,7	32,8	32,9	33,0	33,1	33,2
364,61	365,77	366,93	368,09	369,25	370,41	371,57	372,73	373,89	375,06	376,22	377,38	378,54	379,70	380,86	382,02	383,18	384,35	385,51
16543	16532	16521	16510	16499	16488	16477	16466	16456	16445	16435	16424	16413	16402	16391	16381	16370	16359	16349
18574	18624	18673	18723	18773	18823	18873	18922	18972	19022	19072	19122	19171	19221	19271	19321	19371	19420	19470

4,7	5,0	5,3	5,7	6,0	6,3	6,7	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	8,7	9,0	9,3	9,7	10,0	10,3	10,7
-11,41	-11,12	-10,84	-10,56	-10,28	-10,00	-9,71	-9,43	-9,15	-8,87	-8,59	-8,30	-8,02	-7,74	-7,46	-7,17	-6,89	-6,61	-6,33
1,53	1,47	1,40	1,33	1,26	1,20	1,13	1,06	1,00	0,93	0,87	0,80	0,74	0,67	0,60	0,54	0,47	0,41	0,34

33,3	33,4	33,5	33,6	33,7	33,8	33,9	34,0	34,1	34,2	34,3	34,4	34,5	34,6	34,7	34,8	34,9	35,0	35,1	35,2	35,3
386,67	387,83	388,99	390,15	391,31	392,47	393,63	394,80	395,96	397,12	398,28	399,44	400,60	401,76	402,92	404,08	405,25	406,41	407,57	408,73	409,89
16338	16327	16316	16306	16296	16285	16275	16265	16255	16245	16235	16225	16214	16205	16194	16184	16174	16164	16154	16144	16133
19520	19570	19620	19669	19719	19769	19819	19868	19918	19968	20018	20068	20117	20167	20217	20267	20317	20366	20416	20466	20516

11,0	11,3	11,7	12,0	12,3	12,7	13,0	13,3	13,7	14,0	14,3	14,7	15,0	15,3	15,7	16,0	16,3	16,7	17,0	17,3	17,7
-6,05	-5,76	-5,48	-5,20	-4,92	-4,64	-4,35	-4,07	-3,79	-3,51	-3,22	-2,94	-2,66	-2,38	-2,10	-1,81	-1,53	-1,25	-0,97	-0,69	-0,40
0,28	0,21	0,14	0,08	0,02	-0,05	-0,11	-0,17	-0,23	-0,29	-0,36	-0,42	-0,48	-0,54	-0,61	-0,67	-0,73	-0,79	-0,85	-0,91	-0,98

35,4	35,5	35,6	35,7	35,8	35,9	36,0	36,1	36,2	36,3	36,4	36,5
411,05	412,21	413,37	414,54	415,70	416,86	418,02	419,18	420,34	421,50	422,66	423,82
16123	16113	16102	16092	16082	16073	16062	16052	16041	16031	16021	16010
20566	20615	20665	20715	20765	20814	20864	20914	20964	21014	21063	21113

18,0	18,3	18,7	19,0	19,3	19,7	20,0	20,3	20,7	21,0	21,3	21,7
-0,12	0,16	0,44	0,73	1,01	1,29	1,57	1,85	2,14	2,42	2,70	2,98
-1,04	-1,10	-1,17	-1,23	-1,30	-1,35	-1,42	-1,48	-1,55	-1,61	-1,67	-1,74

ДОДАТОК 3

Таблиця значень для рис. 4.19

диаметр	50,0	50,1	50,2	50,3	50,4	50,5	50,6	50,7	50,8	50,9	51,0	51,1	51,2	51,3	51,4
масса	348,3	349,3	350,2	351,2	352,1	353,1	354,0	355,0	355,9	356,9	357,8	358,8	359,7	360,7	361,6
частота	16701	16695	16688	16681	16674	16668	16661	16654	16647	16641	16633	16627	16620	16613	16607
площадь поверхности	17877	18002	18127	18253	18378	18503	18629	18754	18880	19005	19130	19256	19381	19506	19632

относительное увеличение диаметра	50,0	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8
относительное смещение массы	411,55	-15,36	-15,13	-14,90	-14,67	-14,44	-14,21	-13,98	-13,75	-13,52	-13,29	-13,06	-12,83	-12,60	-12,36	-12,13
относительное смещение частоты	16293,00	2,50	2,47	2,42	2,38	2,34	2,30	2,26	2,22	2,17	2,14	2,09	2,05	2,01	1,96	1,93

51,5	51,6	51,7	51,8	51,9	52,0	52,1	52,2	52,3	52,4	52,5	52,6	52,7	52,8	52,9	53,0	53,1	53,2
362,6	363,5	364,5	365,4	366,4	367,3	368,3	369,2	370,2	371,2	372,1	373,1	374,0	375,0	375,9	376,9	377,9	378,8
16600	16593	16587	16580	16573	16566	16560	16553	16547	16540	16533	16526	16520	16513	16506	16500	16493	16487
19757	19882	20008	20133	20259	20384	20509	20635	20760	20886	21011	21137	21262	21387	21513	21638	21764	21889
3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,4	4,6	4,8	5	5,2	5,4	5,6	5,8	6	6,2	6,4
-11,90	-11,67	-11,44	-11,21	-10,98	-10,74	-10,51	-10,28	-10,05	-9,82	-9,58	-9,35	-9,12	-8,88	-8,65	-8,42	-8,19	-7,95
1,88	1,84	1,80	1,76	1,72	1,68	1,64	1,60	1,56	1,52	1,47	1,43	1,39	1,35	1,31	1,27	1,23	1,19
53,3	53,4	53,5	53,6	53,7	53,8	53,9	54,0	54,1	54,2	54,3	54,4	54,5	54,6	54,7	54,8	54,9	55,0
379,8	380,7	381,7	382,7	383,6	384,6	385,6	386,5	387,5	388,5	389,4	390,4	391,4	392,3	393,3	394,3	395,2	396,2
16480	16473	16467	16460	16453	16446	16440	16433	16427	16420	16414	16406	16400	16393	16387	16380	16374	16367
22015	22140	22266	22391	22516	22642	22767	22893	23018	23144	23269	23395	23520	23646	23771	23897	24023	24148

53,3	53,4	53,5	53,6	53,7	53,8	53,9	54,0	54,1	54,2	54,3	54,4	54,5	54,6	54,7	54,8	54,9	55,0	55,1	55,2
379,8	380,7	381,7	382,7	383,6	384,6	385,6	386,5	387,5	388,5	389,4	390,4	391,4	392,3	393,3	394,3	395,2	396,2	397,2	398,1
16480	16473	16467	16460	16453	16446	16440	16433	16427	16420	16414	16406	16400	16393	16387	16380	16374	16367	16361	16354
22015	22140	22266	22391	22516	22642	22767	22893	23018	23144	23269	23395	23520	23646	23771	23897	24023	24148	24274	24399
6,6	6,8	7	7,2	7,4	7,6	7,8	8	8,2	8,4	8,6	8,8	9	9,2	9,4	9,6	9,8	10	10,2	10,4
-7,72	-7,48	-7,25	-7,02	-6,78	-6,55	-6,31	-6,08	-5,85	-5,61	-5,38	-5,14	-4,91	-4,67	-4,44	-4,20	-3,97	-3,73	-3,49	-3,26
1,15	1,10	1,07	1,02	0,98	0,94	0,90	0,86	0,82	0,78	0,74	0,69	0,66	0,61	0,58	0,53	0,50	0,45	0,42	0,37

55,3	55,4	55,5	55,6	55,7	55,8	55,9	56,0	56,1	56,2	56,3	56,4	56,5	56,6	56,7	56,8	56,9
399,1	400,1	401,1	402,0	403,0	404,0	405,0	405,9	406,9	407,9	408,9	409,8	410,8	411,8	412,8	413,7	414,7
16348	16341	16335	16329	16322	16315	16309	16302	16296	16290	16283	16277	16270	16264	16257	16251	16244
24525	24650	24776	24901	25027	25152	25278	25404	25529	25655	25780	25906	26032	26157	26283	26408	26534
10,6	10,8	11	11,2	11,4	11,6	11,8	12	12,2	12,4	12,6	12,8	13	13,2	13,4	13,6	13,8
-3,02	-2,79	-2,55	-2,31	-2,08	-1,84	-1,60	-1,37	-1,13	-0,89	-0,65	-0,42	-0,18	0,06	0,30	0,53	0,77
0,34	0,29	0,26	0,22	0,18	0,14	0,10	0,06	0,02	-0,02	-0,06	-0,10	-0,14	-0,18	-0,22	-0,26	-0,30

ДОДАТОК 4

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

1. 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.

2. L. Perchevska, O. Drozdenko, K. Drozdenko, and O. Leiko, “Study of the influence of the housing on the cooling efficiency of the piezoceramic electroacoustic Langevin-type transducer” Technol. Audit Prod. Reserv., vol. 3, no. 1(59), pp. 50–55, Jun. 2021, DOI: 10.15587/2706-5448.2021.231279.

3. Перчевська Л. В., Дрозденко О.І., Дрозденко К.С., і Лейко О.Г.. «Забезпечення теплового режиму роботи стержневих конструкцій п’єзокерамічних електроакустичних перетворювачів». Мікросистеми, Електроніка та Акустика, вип. 24, вип. 5, Жовтень 2019, с. 56-63, doi:10.20535/2523-4455.2019.24.5.190452.

4. O. Drozdenko, K. Drozdenko, and L. Perchevska, “Features of thermal fields calculation for cylindrical piezoceramic transducers with compensated design” in 2018 IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW), 2018, pp. 44–47.

5. O. Drozdenko, K. Drozdenko, and L. Perchevska, “Methods for Analyzing the Thermal Field of Rod Type Piezoceramic Electroacoustic Transducer” in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019 - Proceedings, 2019, DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783805.

6. O. Drozdenko, K. Drozdenko, O. Leiko, and L. Perchevska, “The Thermal Fields Analysis of Sealed Cylindrical Piezoceramic Electroacoustic Transducers Compensated Construction” in 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2020, pp. 815–819, DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088757.