

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'язку 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 рідиннозаповненої конструкції та

для моделі з герметизацією торців. Обґрунтований вибір програмного середовища для моделювання теплових полів. В результаті моделювання було отримано двота 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 investigated 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.