

Забезпечення теплового режиму роботи стержневих конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів

Перчевська^f Л. В., ORCID [0000-0003-0117-5163](https://orcid.org/0000-0003-0117-5163)
Дрозденко О. І., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-6647-1428](https://orcid.org/0000-0001-6647-1428)
Дрозденко К. С., к.т.н., ORCID [0000-0002-7653-600X](https://orcid.org/0000-0002-7653-600X)
Лейко^s О. Г., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)
Кафедра акустики та акустоелектроніки <http://acoustic.kpi.ua>
Факультет електроніки <http://fel.kpi.ua>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

Анотація—Розглянуто два методи аналізу теплових полів для конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів – аналітичний розрахунок та моделювання. Проаналізовано причини виникнення нагріву, а також негативні наслідки, до яких призводить нагрів перетворювачів. Обґрунтовано необхідність аналізу теплових полів саме для п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів стержневої конструкції. Проведено порівняння аналітичного методу знаходження теплового поля, заснованого на розв'язанні диференціального рівняння теплопровідності Фур'є, і комп'ютерного моделювання, виконаного за допомогою методу скінчених елементів в системі автоматизованого проектування SolidWorks. Проведено чисельні розрахунки теплових полів розглянутими методами для типової конструкції стержневого перетворювача. Показано процес розігріву електроакустичного перетворювача. Встановлено, що моделювання дозволяє врахувати конструкційні особливості перетворювачів і дозволяє швидше змінювати параметри елементів для пошуку найбільш раціонального конструкторського рішення. Отримані результати можуть бути використані при конструюванні стержневих п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів.

Ключові слова — п'єзокерамічний електроакустичний перетворювач; стержневий перетворювач; теплові поля; диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є; моделювання теплового поля; процес розігріву.

І. ВСТУП

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 та систем. 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, аромні та інші, спеціальної форми. Широко розповсюджені стержневі перетворювачі через можливість випромінювати широкий діапазон частот акустичних хвиль, наприклад, в ультразвуковому технологічному обладнанні [1, 2], в медицині, а саме в хірургії [3–5], та в гідроакустиці [1, 6–8].

В процесі роботи на перетворювач діють експлуатаційні навантаження, найбільш небезпечні – теплові навантаження [1, 2, 6, 7]. Нагрівання перетворювача

відбувається завдяки наступним факторам: тепловиділення, що відбувається з причини внутрішніх механічних втрат в п'єзокераміці (втрати на тертя); нагрівання п'єзокераміки через протікання через неї змінного електричного струму; перенесення тепла від пасивної накладки та робочого інструменту; від нагрівання робочого середовища.

Нагрівання ПЕП призводить до таких негативних наслідків – деполяризація та старіння п'єзокераміки, зміна робочої частоти та частоти резонансу, зміна електричного імпедансу та порушення умов узгодження з генератором, обмеження щодо тривалості роботи та режиму роботи [1, 2, 8–14], (Патент РФ № 2304947). Перегрів перетворювача може призвести до виходу з ладу окремих компонентів, або й цілого пристрою.

Боротися з проблемою розігріву можна двома принципово різними способами.

Перший спосіб – зменшити втрати енергії, тим самим зменшити утворення тепла. Його застосовують для тих приладів, в яких є можливість здійснювати заміну конструкційних матеріалів для корегування



вихідних параметрів ПЕП. Наприклад, використовувати інший тип п'єзокераміки [15], змінити форму накладок на більш енергоефективну [16]. Також має значення робоча частота перетворювача. Якщо він працює на частоті резонансу, то тепловиділення пропорційне тільки пружним втратам. При використанні антирезонансної частоти додаються діелектричні, пружні, п'єзоелектричні втрати [17, 18].

Другий спосіб – покращити систему відведення тепла або застосувати додаткові охолоджувальні елементи.

Проблема нагрівання ПЕП важлива для медицини, зокрема хірургії. В [3–5] описується недолік факоемульсификатора через нагрівання робочих частин приладу та зовнішніх тканин пацієнта. Для уникнення перегріву п'єзокераміки ПЕП в хірургічних системах пропонують використовувати імпульсний і розривний режими [18–20], (патент РФ № 2304947), або охолоджуючі елементи (патент РФ № 2255685). Недоліком традиційного імпульсного режиму є неможливість зменшення впливу ультразвуку до менше 50% коефіцієнта заповнення. Є також проблема малої вихідної потужності (патент US № 8188638), коли через нагрівання ПЕП прилад не може працювати ефективно.

Гідроакустичні перетворювачі краще охолоджуються робочим середовищем через те, що тепловіддача у рідину в десятки разів більше, ніж у газ. Однак з настанням кавітації в рідині зменшується вихід акустичної енергії у середовище, що може призвести до додаткового нагрівання [6, 7, 15]. Дуже важливо взяти до уваги температурні навантаження в структурних елементах на етапі аналізу надійності виробу, що проектується [7], в іншому випадку можлива поломка.

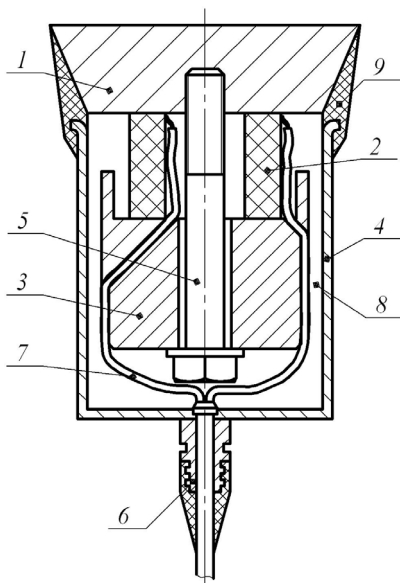


Рис. 1. Типова конструкція стержневого ПЕП: 1 – передня накладка, 2 – п'єзокерамічний елемент, 3 – тильна накладка, 4 – корпус, 5 – болтова стяжка, 6 – ввід кабелю, 7 – провід, 8 – газ, 9 – кріплення.

Для надійної та ефективної роботи ПЕП необхідно ще на етапі проектування оцінити величину теплових навантажень і, якщо необхідно, вжити заходів для зменшення нагрівання. Відповідно, для цього потрібні методи оцінки теплових полів і значень теплових навантажень. Ці методи розроблені в основному для циліндричних ПЕП та базуються на розв'язанні диференціального рівняння теплопровідності [1]. Для стержневих перетворювачів задачу пропонується розв'язувати за допомогою комп'ютерного моделювання теплового поля [16].

В цілому, з нагріванням перетворювача можливо боротися достатньо маловитратними та ефективними шляхами, якщо заздалегідь знати про цю проблему і вирішувати її в процесі конструювання ПЕП. Складніше усунути нагрівання в уже сконструйованому приладі.

Метою даної роботи є проаналізувати різні варіанти знаходження теплових полів ПЕП стержневого типу, а саме – аналітичний, заснований на розв'язанні диференціального рівняння теплопровідності, та комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів в системі автоматизованого проектування SolidWorks, для визначення можливості застосувати зазначені методи під час конструювання в частині забезпечення теплового режиму ПЕП.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У силовій конструкції стержневого перетворювача (рис. 1, [1]) активний елемент, передня та тильна накладки утворюють єдину коливальну систему, механічний резонанс якої визначає робочу частоту випромінювання перетворювача. Кріплення активного елемента до корпусу здійснюється через полімерну розв'язку. Електроізоляція та акустичне екранування коливальних активних елементів забезпечуються шаром повітря або інертного газу, наприклад, елегазу. Герметизація перетворювача здійснюється шляхом розміщення його коливальної системи в корпусі. Полімерна розв'язка дозволяє запобігти передачі коливальних передньої накладки на корпус перетворювача. Статичні напруження в активному елементі, які створюються в перетворювачі з метою підвищення міцності п'єзокерамічного елемента або пакета елементів на розтягнення, конструкційно реалізуються за допомогою болтової стяжки.

Для знаходження теплового поля за допомогою розв'язання рівняння теплопровідності застосуємо спрощену модель стержневого ПЕП. Перетворювач замінимо системою шарів, де врахуємо найбільш важливі конструктивні елементи (рис. 2). Замінимо випромінюючу накладку шаром 1, активний елемент шаром 2, тильну накладку шаром 3, з відповідними товщинами.

Розв'язуємо одновимірну задачу, де врахуємо тільки розподіл температури по товщині перетворювача. Зазначимо, що лише в середньому шарі (який відповідає активному елементу) відбувається виділення тепла.

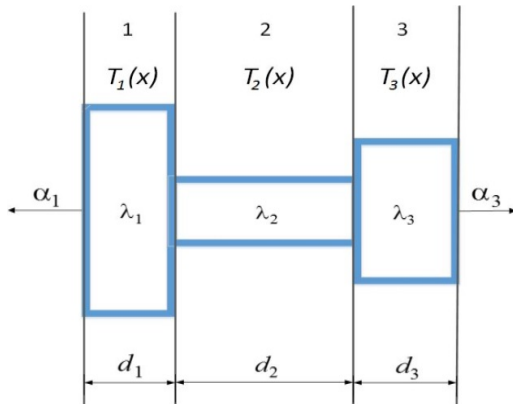


Рис. 2. Спрощена модель стержневого ПЕП

На рис. 2 позначено: $T_1(x)$, $T_2(x)$, $T_3(x)$ – температури відповідних шарів; d_1 , d_2 , d_3 – товщини шарів; λ_1 , λ_2 , λ_3 – коефіцієнти теплопровідності шарів; α_1 , α_3 – коефіцієнти тепловіддачі поверхонь накладок в навколишнє середовище.

Для знаходження температурного поля, в доповнення до геометричних параметрів, необхідно також знати температуру середовища, параметри матеріалів (густину, коефіцієнт теплопровідності), а також густину теплового потоку. Останній розраховується з урахуванням того, що тільки в середньому шарі, тобто активному елементі, виділяється тепло.

Можливі декілька шляхів знаходження теплового поля перетворювача: практичний – зняття показань з перетворювача під час його роботи, теоретичний – аналітичний розрахунок математичної моделі та комп'ютерне моделювання.

Існує кілька шляхів теоретичного розрахунку теплового навантаження – розрахунок через втрати енергії, метод скінченних елементів, метод зв'язаних полів. В будь-якому випадку, для знаходження розподілу температури в перетворювачі необхідно застосувати диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є.

III. ЗНАХОДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗВ'ЯЗАННЯ РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ФУР'Є

Для знаходження теплового поля перетворювача використаємо диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є в наступному вигляді [1, 8]:

$$\lambda_T \nabla^2 T + q_v = C_T \rho \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

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.

Конструктору для забезпечення теплового режиму ПЕП необхідна інформація як про максимальну температуру розігріву (стаціонарний режим), так і

про час, за який вона буде досягнута (перехідний режим). Аналіз перехідного режиму аналітичним методом є досить складним, тому надалі в цьому розділі розглядаємо стаціонарний режим роботи ПЕП. У випадку стаціонарного температурного поля, права частина рівняння (1) дорівнює нулю:

$$\lambda_T \nabla^2 T + q_v = 0. \quad (2)$$

Диференціальне рівняння теплопровідності в загальному вигляді для стаціонарного процесу запишемо в наступному вигляді, розділивши рівняння (2) на коефіцієнт теплопровідності:

$$\nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda_T} = 0, \quad (3)$$

де q_v/λ_T – характеризує виділення тепла лише в середньому шарі.

Рівняння (3) для кожного шару та його розв'язок у загальному вигляді:

- для пасивного шару 1 – випромінююча накладка:

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} = 0, \quad T_1(x) = xC_1 + C_2,$$

- для тепловиділяючого шару 2 – активний елемент:

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

- для пасивного шару 3 – тильна накладка:

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

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

- 1) Рівність температури в точках контакту шарів:

$$T_{1|x=0} = T_{s1}, \quad T_{1|x=d_1} = T_{2|x=d_1},$$

$$T_{2|x=d_1+d_2} = T_{3|x=d_1+d_2}, \quad T_{3|x=d_1+d_2+d_3} = T_{s3},$$

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

- 2) Рівність теплового потоку на границях тіла з оточуючою середою:

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

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(x)}{\partial x} = \alpha_3 (T_{s3} - T_c)_{|x=d_1+d_2+d_3}.$$

- 3) Рівність теплового потоку на границях шарів:



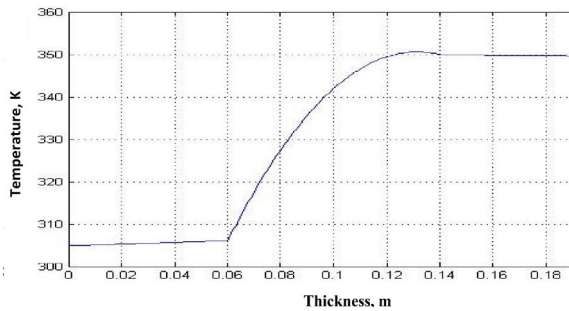


Рис. 3. Розподіл температури в ПЕП

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x)}{\partial x|_{x=d_1}} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x)}{\partial x|_{x=d_1}},$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x)}{\partial x|_{x=d_1+d_2}} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(x)}{\partial x|_{x=d_1+d_2}}.$$

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 $C_1..C_6$ і температур поверхонь накладок T_{s1} і T_{s3} отримані підстановкою загальних розв'язків рівнянь теплопровідності в граничні умови і мають наступний вигляд:

$$T_{s1} = T_c + q_v \frac{B}{A},$$

де

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

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

$$T_{s3} = -\frac{\alpha_1}{\alpha_3} T_{s1} + T_c \left[\frac{\alpha_1}{\alpha_3} + 1 \right] + \frac{d_1}{\alpha_3} q_v,$$

$$C_1 = \frac{\alpha_1 (T_{s1} - T_c)}{\lambda_1}, \quad C_2 = T_{s1},$$

$$C_3 = \frac{\alpha_1 (T_{s1} - T_c)}{\lambda_2}, \quad C_4 = d_1 C_1 + C_2,$$

$$C_5 = \frac{\alpha_3 (-T_{s3} + T_c)}{\lambda_3}, \quad C_6 = -\frac{q_v}{2\lambda_2} (d_2)^2 + C_3 d_2 + C_4.$$

Для знаходження числових значень теплового поля був взятий стержневий перетворювач з наступними геометричними та фізичними параметрами. Стержневий перетворювач складається з двох накладок та активного елемента. Передня накладка – випромінююча, має більший радіус для збільшення площі випромінювання та здійснює випромінювання

акустичних хвиль у воду. В той час задня накладка має бути важкою для запобігання небажаним коливанням. Активний елемент – це 8 п'єзокерамічних кілець зовнішнім радіусом 38 мм, внутрішнім радіусом 16 мм, загальною товщиною $d_2 = 0,08$ м з п'єзокераміки ЦТБС-3, $\lambda_2 = 1,9$ Вт/(м·К); випромінююча накладка з алюмінієвого сплаву АМг-6 товщиною $d_1 = 0,06$ м і радіусом 60 мм, $\lambda_1 = 117$ Вт/(м·К); тильна накладка зі сталі Ст-20 товщиною $d_3 = 0,06$ м і радіусом 50 мм, $\lambda_3 = 50$ Вт/(м·К). Об'ємна потужність джерел тепловиділення для розрахунку обирається $q_v = 33 \cdot 10^3$ Вт/м³, а температура навколишнього середовища $T_c = 25^0$ C. Коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_1 = 350$ Вт/(м²·К) та $\alpha_3 = 5,6$ Вт/(м²·К) (взяті середні значення для тепловіддачі метал-вода та метал-газ).

Отримано графік розподілу температури (рис.3), по осі абсцис – довжина шарів в метрах, по осі ординат – температура в Кельвінах:

В результаті бачимо, що найбільша температура в п'єзокерамічному елементі та тильній накладці, що пояснюється поганою тепловіддачею в газове середовище.

IV. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Комп'ютерне моделювання має великі переваги перед аналітичними розрахунками: враховується реальна геометрична форма перетворювача, є можливість змоделювати сталий стан – час, за який перетворювач остаточно нагріється, можна застосувати тепловіддачу до всіх поверхонь, швидко змінювати характеристики матеріалів, розв'язувати завдання конструювання в цілому.

Моделювання проводилось в програмі SolidWorks, в ній реалізується метод скінченних елементів.

Для комп'ютерного моделювання також за основу візьмемо конструкцію ПЕП (Рис. 1) і максимально спростимо її до основних елементів (Рис. 4): 1 – випромінююча накладка, 2 – активний елемент, 3 – тильна накладка. Геометричні розміри елементів та параметри їх матеріалів візьмемо такими ж, як для аналітичного розрахунку, наведеного в розділі III. Необхідні для моделювання параметри матеріалів активного елемента (п'єзокераміка ЦТБС-3) та випромінюючої накладки (алюмінієвий сплав АМг-6), були додані в бібліотеку SolidWorks вручну. Матеріал тильної накладки – сталь AISI 1020, що є аналогом сталі Ст-20, взятий з вбудованої бібліотеки SolidWorks. Коефіцієнт тепловіддачі встановлюється за допомогою конвекції на поверхні відповідного елемента. Всі поверхні тильної та передньої накладок контактують з газом, окрім випромінюючої поверхні передньої накладки, яка контактує з навколишнім середовищем (рідиною). Числові значення коефіцієнтів тепловіддачі наведено в розділі III.



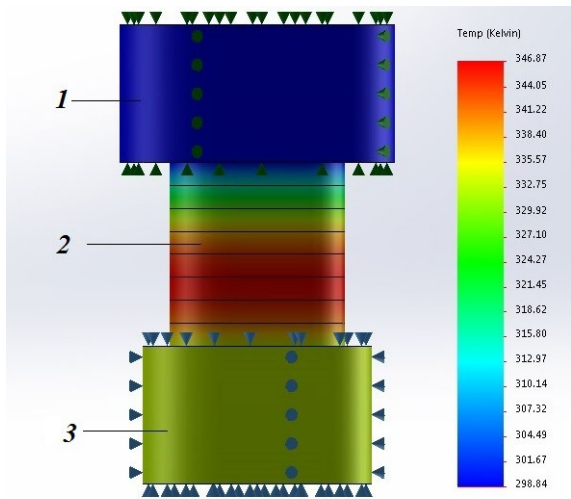


Рис. 4. Теплове поле перетворювача

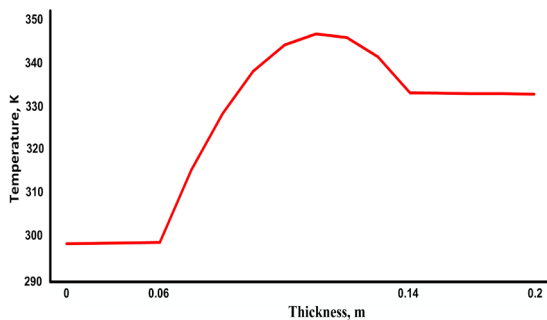


Рис. 5. Графік розподілу температури в сталому режимі

Розподіл температури на поверхні перетворювача показано на Рис. 4.

Для більш зручного та точного аналізу наведено графік розподілу тепла (Рис. 5) на поверхні перетворювача в сталому режимі.

Порівнюючи графіки, отримані моделюванням (Рис. 5) та за теоретичними розрахунками (Рис. 3), можна сказати, що розподіл тепла вздовж перетворювача має схожий характер, однак є деякі відмінності, наприклад пік температури на Рис. 3 знаходиться ближче до тильної накладки.

V. ПРОЦЕС РОЗІГРІВУ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Завдяки комп'ютерному моделюванню можливо дослідити процес розігріву конструкції. На Рис. 6 показано перехідний режим розігріву ПЕП, а саме, залежність температури від часу в трьох точках перетворювача – на випромінюючій накладці (червона лінія), точка максимального розігріву на активному елементі (синя лінія) і на тильній накладці (зелена лінія).

Процес розігріву перетворювача показано на Рис. 7–9 за допомогою температурного поля ПЕП, зафіксованого через певні інтервали часу від початку роботи. Видно, що на початку роботи весь перетворювач майже однієї температури. Надалі, через більшу тепловіддачу у воду, температура передньої накладки залишилась майже без зміни, в той же час, тильна накладка нагрівається. Отже за умови доброї гідроізоляції, можливе швидке зменшення нагріву в даному перетворювачі.

Процес розігріву може бути інформативним, коли змінити конструкцію для покращення теплового режиму неможливо і, відповідно, завадити нагріванню не має змоги. У такому випадку необхідно проаналізувати час, за який перетворювач розігріється до допустимої температури, для реалізації імпульсного режиму, коли перетворювач буде охолоджуватись під час пауз, тривалість яких потребує додаткових досліджень.

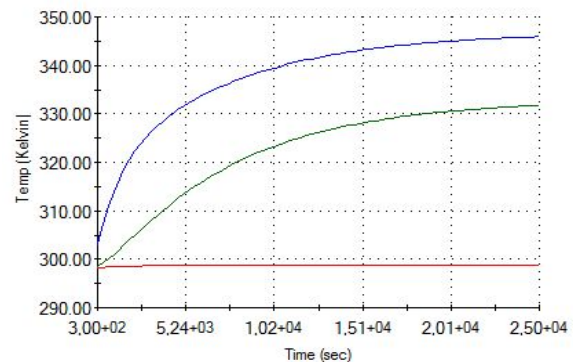


Рис. 6. Графік розігріву перетворювача

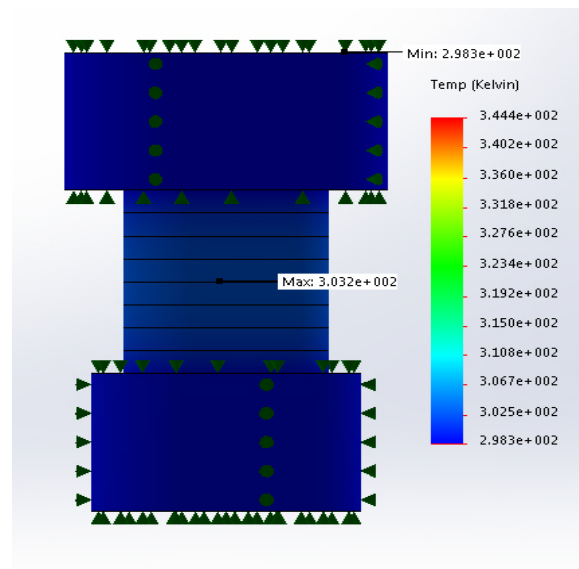


Рис. 7. Теплове поле ПЕП через 300 секунд після початку роботи

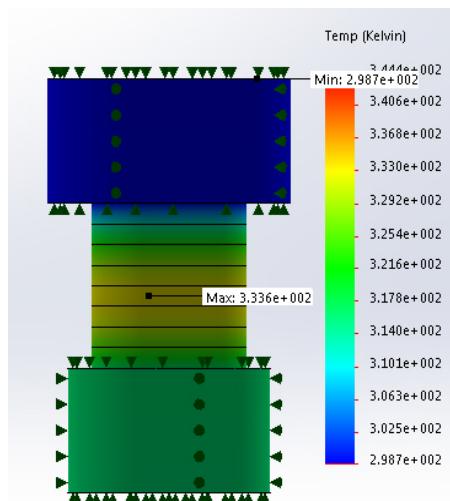


Рис. 8. Теплове поле ПЕП через 6000 секунд після початку роботи

ВИСНОВКИ

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.

Для врахування теплових навантажень необхідно знати розподіл температури в конструкціях ПЕП у робочому режимі. Найбільш об'єктивним методом аналізу теплового поля є його безпосереднє вимірювання на працюючому перетворювачі, проте це вкрай важко реалізувати на практиці. Оскільки інформація про теплове поле ПЕП необхідна ще на етапі конструювання, то це завдання можливо вирішити методом аналітичного розрахунку або за допомогою комп'ютерного моделювання, аналіз якого проведено в даній роботі.

Порівнюючи графік теоретичного результату (Рис. 3) та отриманий під час моделювання (Рис.5), можна зробити висновок, що розподіл тепла по довжині перетворювача збігається, але пікова температура в теоретичному графіку падає ближче до тильної частини. Отримані значення температури за допомогою розрахунків та комп'ютерного моделювання відрізняються між собою: на випромінюючій накладці – 2,35%, на активному елементі в 1,44% та на тильній накладці у 5,11%. Найбільша відмінність пояснюється тим, що при моделюванні тепловіддача від задньої накладки застосовувалась для трьох поверхонь, тоді як для розрахунків використовувався нескінченний шар заданої товщини, тобто віддача тепла відбувається лише від однієї поверхні.

Аналізуючи отримані результати, бачимо, що для забезпечення теплового режиму можна застосовувати обидва методи. При цьому моделювання має перевагу, бо дозволяє проводити дослідження конкретної конструкції перетворювача, дає можливість швидко

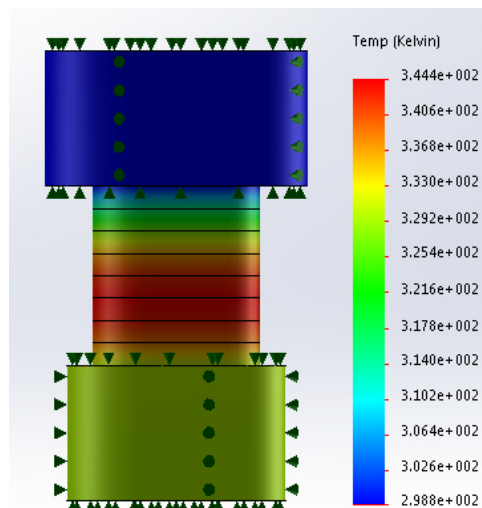


Рис. 9. Теплове поле ПЕП через 18000 секунд після початку роботи

змінювати параметри елементів для пошуку найбільш раціонального конструкторського рішення та наочно спостерігати результати внесених змін. Ґрунтовний аналіз зазначених методів є новизною роботи.

Слід також зауважити, що при вирішенні завдання не був врахований вплив на кінцевий результат додаткових елементів конструкції ПЕП, таких як елементи армування, герметизації, електричних з'єднань, корпусу, що потребує додаткових досліджень. Врахувати ці моменти аналітичним шляхом практично неможливо, тому варто проводити подальші дослідження саме за допомогою комп'ютерного моделювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. S. Didkovskiy, S. M. Poroshin, O. G. Leyko, A. O. Leyko, and O. I. Drozdenko, *Construction of electroacoustic devices and systems for multimedia acoustic technology*. K.: NTUU "KPI," 2013.
- [2] G. Hmelev, V. Barsukov, and E. Ilchenko, "Study of the effect of temperature on the parameters of ultrasonic oscillatory systems," *Polzunovsky Alm.*, vol. 1, pp. 54–58, 2013.
- [3] O. Kalisz *et al.*, "Thermographic evaluation of healing process on patients after surgery of cataract with the use of phacoemulsification," in *Proceedings of the 2008 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 2008, DOI: [10.21611/qirt.2008.03_04_17](https://doi.org/10.21611/qirt.2008.03_04_17).
- [4] 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.
- [5] B. M. Aznabaev, *Ultrasonic cataract surgery - phacoemulsification*, August Bor. Moscow, 2005, ISBN: 5-901053-21-4.
- [6] A. C. H. Tan and F. S. Hover, "On the influence of transducer heating in underwater ultrasonic thrusters," *20th International Congress on Acoustics (ICA 2010)*, 2010, no. August, pp. 371–377. URL: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p368.pdf.
- [7] M.V. Bogush, E.M. Bogush, and E.M. Pikalev, "Analysis of temperature stresses in the elements of hydroacoustic antennas," *Instrumentation*, vol. 10, no. 160, pp. 38–42, 2013. ISSN: 2071-7865

- [8] 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.
- [9] 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", *International Conference on Material Science and Applications (Icmsa 2015)*, 2015, vol. 3, pp. 723–727. DOI: [10.2991/icmsa-15.2015.132](https://doi.org/10.2991/icmsa-15.2015.132)
- [10] 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](https://doi.org/10.3390/s140101208).
- [11] K. S. Drozdenko, "Single-channel focusable acoustothermometer for measuring the internal temperature of biological object," *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 56, no. 4, pp. 207–211, Apr. 2013, DOI: [10.3103/S0735272713040067](https://doi.org/10.3103/S0735272713040067).
- [12] 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](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2256121).
- [13] Y. Su, Y. Liu, D. Vasic, F. Costa, W. Wu, and K. Lee, "Power Enhancement of Piezoelectric Transformer by Adding Thermal Dissipation Layers," in *ICAST2013: 24th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, 2013, pp. 239–250.
- [14] H. Li, Z. D. Deng, and T. J. Carlson, "Piezoelectric Materials Used in Underwater Acoustic Transducers," *Sens. Lett.*, vol. 10, no. 3, pp. 679–697, Mar. 2012, DOI: [10.1166/sl.2012.2597](https://doi.org/10.1166/sl.2012.2597).
- [15] 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, 2017, DOI: [10.1016/j.ultras.2016.11.008](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.11.008).
- [16] V. T. Rathod, "A Review of Electric Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors, Actuators and Transducers," *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 169, Feb. 2019, DOI: [10.3390/electronics8020169](https://doi.org/10.3390/electronics8020169).
- [17] M. R. Karafi and F. Khorasani, "Evaluation of mechanical and electric power losses in a typical piezoelectric ultrasonic transducer," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 288, no. 2019, pp. 156–164, 2019, DOI: [10.1016/j.sna.2018.12.044](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.12.044).
- [18] L.K. Sienkiewicz, "Concept, implementation and analysis of the piezoelectric resonant sensor/actuator for measuring the aging process of human skin", INP Toulouse, 2016. https://oatao.univ-toulouse.fr/16248/1/Sienkiewicz_Lukasz.pdf.
- [19] A. M. Al-Jumaily and A. Meshkinzar, "On the Development of Focused Ultrasound Liquid Atomizers," *Adv. Acoust. Vib.*, vol. 2017, pp. 1–10, 2017, DOI: [10.1155/2017/7861726](https://doi.org/10.1155/2017/7861726).
- [20] A. Lozano, H. Amaveda, F. Barreras, X. Jorda', and M. Lozano, "High-Frequency Ultrasonic Atomization With Pulsed Excitation," *J. Fluids Eng.*, vol. 125, no. 6, pp. 941–945, Nov. 2003, DOI: [10.1115/1.1603301](https://doi.org/10.1115/1.1603301).

Надійшла до редакції 17 вересня 2019 р.

УДК 534.232:534.8

Обеспечение теплового режима работы стержневых конструкций пьезокерамических электроакустических преобразователей

Перчевська^f Л. В., ORCID [0000-0003-0117-5163](https://orcid.org/0000-0003-0117-5163)

Дрозденко А. И., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-6647-1428](https://orcid.org/0000-0001-6647-1428)

Дрозденко К. С., к.т.н., ORCID [0000-0002-7653-600X](https://orcid.org/0000-0002-7653-600X)

Лейко^s А. Г., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)

Кафедра акустики и акустоэлектроники <http://acoustic.kpi.ua>

Факультет електроніки <http://fel.kpi.ua>

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» <http://kpi.ua>

Киев, Украина

Аннотация— Рассмотрены методы анализа тепловых полей для конструкций пьезокерамических электроакустических преобразователей. Проанализированы причины возникновения нагрева, а также негативные последствия, к которым приводит нагрев преобразователей. Обоснована необходимость анализа тепловых полей именно для пьезокерамических электроакустических преобразователей стержневой конструкции. Проведено сравнение аналитического метода нахождения теплового поля, основанного на решении дифференциального уравнения теплопроводности Фурье, и компьютерного моделирования, выполненного с помощью метода конечных элементов в системе автоматизированного проектирования SolidWorks. Проведены численные расчеты тепловых полей рассмотренными методами для типичной конструкции стержневого преобразователя. Показан процесс разогрева электроакустического преобразователя. Установлено, что моделирование тепловых полей проще в реализации, позволяет учесть конструкционные особенности преобразователей и позволяет быстрее менять параметры элементов для поиска наиболее рационального конструкторского решения. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании стержневых пьезокерамических электроакустических преобразователей.



Ключевые слова — пьезокерамический электроакустический преобразователь; стержневой преобразователь; тепловые поля; дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье; моделирование теплового поля; процесс разогрева.

UDC 534.232:534.8

Providing of Rod Piezoceramic Electroacoustic Transducers Thermal Mode Operation

L. V. Perchevska^f, ORCID [0000-0003-0117-5163](https://orcid.org/0000-0003-0117-5163)

O. I. Drozdenko, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0001-6647-1428](https://orcid.org/0000-0001-6647-1428)

K. S. Drozdenko, PhD, ORCID [0000-0002-7653-600X](https://orcid.org/0000-0002-7653-600X)

O. H. Leiko^s, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)

Department of Acoustics and Acoustoelectronics <http://acoustic.kpi.ua>

Faculty of electronics <http://fel.kpi.ua>

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” <http://kpi.ua>

Kyiv, Ukraine

Abstract—The basis of the electro-acoustic transducer is piezoceramics - a quite fragile material. A rod type transducer was chosen for analysis due to the lack of research on this type of transducer and its widespread use. The most dangerous operational load is thermal. The mechanism of the transducer heating and the negative effects that the transducer heating causes are analyzed. Ways of heat prevention are analyzed.

To exclude negative effects, it is necessary to deal with undesirable heating at the stage of construction. To check the construction of the transducer for thermal loads, it is proposed to compare two methods for estimate the temperature field of the transducer. Two methods of thermal field analysis for the construction of piezoceramic electro-acoustic transducers are considered - analytical calculation and modeling in computer-aided design system.

For a proper comparison of the two methods, it is necessary to take the same model of the electro-acoustic transducer for calculation and simulation. In both cases, the transducer is simplified to structurally important elements - the active element, the radiating and the back mass. The active element is CTBS-3 piezoceramic, a radiating mass is made of Amg-6 aluminum and a back mass is made of St-20 steel.

The analytical method for finding the thermal field is based on the solution of the Fourier differential heat equation. A simplified model of an acoustic transducer is presented in the form of three layers, and a thermal conductivity equation is applied to each. Unknown quantities are found by substituting the heat equation into the boundary conditions. Three pairs of boundary conditions are used: the equality of temperature at the points of contact of the layers, the equality of heat flow at the border between the body and the medium, and the equality of heat flow at the boundaries of the layers.

Computer simulation performed using the finite element method in the SolidWorks computer-aided design system. The advantage of the modeling method instead by the calculations is demonstrated. In addition to easy use, rapid change of parameters and the ability to solve more complex problems, modeling can show the heating of the transducer at different points in time.

The heat-up process can be informative when it is impossible to change the design to improve the thermal regime and therefore heating is inevitable. In this case, it is necessary to analyze the time during which the transducer heat-up to the permissible temperature for pulse mode implementation. The obtained results can be used in the design of core piezoceramic electroacoustic transducers.

Keywords — *piezoceramic electroacoustic transducer; rod structure; thermal field; heat equation; thermal field modeling; heating process.*

