

УДК 534.232

О.І. Дрозденко

Метод розрахунку температурних напружень, які виникають в конструкціях п'єзоелектричних перетворювачів, герметизованих гумо-металевими шарами

Предложен метод расчета механических температурных напряжений, которые возникают в процессе изготовления и эксплуатации цилиндрических пьезоэлектрических преобразователей. Установлены закономерности между температурными напряжениями в конструкциях преобразователей и термоупругими свойствами исходных конструкционных материалов.

Method of calculation the mechanical temperature stresses, which arise during the cylindrical piezoelectric transducers manufacturing and its operation, is offered. Laws between temperature stresses in transducers constructions and initial constructional materials thermoelastic properties are established.

Вступ

В процесі виготовлення та експлуатації конструкції електроакустичних приладів та їх елементів повинні витримувати зміни температур. Ці зміни обумовлені особливостями технологічних процесів при виробництві цих приладів, розігрівом конструкцій при випромінюванні приладами великих потужностей та змінами температури оточуючого середовища. При зміні температури в конструкціях електроакустичних приладів та їх елементів, які в загальному випадку є жорстким спряженням різних конструкційних матеріалів, виникає напружений стан деталей, якщо матеріали деталей, що сполучаються, мають різні коефіцієнти лінійного теплового розширення. Різниця в коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів деталей, що сполучається, обумовлює появу розтягуючих механічних напружень.

Перехід температури випромінюючих звук приладів за встановлені межі приводить до температурних змін параметрів, що може призвести навіть до деполяризації активних елементів, порушення цілісності паяного монтажу та втрати ізоляційних властивостей герметизуючими матеріалами [1]. Тому при конструюванні акустичних приладів визначенню максимальних температур розігріву активних елементів та елементів гідроізоляції із полімерних матеріалів повинна бути приділена значна увага. Але для цього по-

трібні методи розрахункової оцінки як температур розігріву конструкцій акустичних приладів, так і величин механічних температурних напружень, які при цьому виникають в цих конструкціях.

Можливі конструкторсько-технологічні шляхи реалізації таких рішень багатогранні. Одним із поширених шляхів зменшення температури розігріву конструкцій електроакустичних приладів є прийняття при конструюванні приладів технічних рішень, направлених на покращення відведення тепла [2, 3].

В багатьох електроакустичних приладах жорстко зчленовуються між собою елементи конструкцій із матеріалів з різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення, внаслідок чого в них виникають термопружні напруження. Для того, щоб виключити їх поширення на активні елементи конструкцій, слід передбачати введення проміжних деталей (розв'язок), які примикають до п'єзокераміки.

Метою роботи є розроблення методу для розрахунків механічних температурних напружень, які виникають в перетворювачах, та дослідження залежностей цих напружень від особливостей конструкції на прикладі циліндричного перетворювача, герметизованого гумо-металевими шарами.

1. Розігрів конструкцій акустичних приладів під час випромінювання акустичної енергії

При експлуатації електроакустичних приладів на їх конструкції діють такі фізичні фактори як флуктуації температури зовнішнього середовища та внутрішній розігрів приладів. При цьому, коли в конструкціях приладів має місце жорстке з'єднання матеріалів з різними коефіцієнтами лінійного розширення α_{Ti} , то ці фактори породжують можливість виникнення температурних механічних напружень σ_T . Крім того, розігрів акустичних приладів, які випромінюють великі потужності, характеризується зміною параметрів активних елементів акустичних приладів. Температура розігріву конструкції випромінюючого приладу залежить від кількості виділеного в ньому тепла і ефективності схеми тепловідводу.

Встановимо, чим визначається кількість виділеного тепла при випромінюванні електроакустичним приладом акустичної потужності W_a . Електрична напруга U , яка збуджує акустичний прилад, створює в його елементах, що деформуються, механічні напруження σ . Сумісна дія електричної напруги і механічних напружень обумовлює розігрів випромінювача. Зауважимо, що випромінювана приладом акустична потужність обмежується температурами розігріву його конструкції.

Електрична напруга, необхідна для збудження акустичного приладу на будь-якій частоті, становить [1]:

$$U = \sqrt{\frac{W_a \cdot Z_M^2}{n^2 \cdot r_S}}, \quad (1)$$

де $Z_M = r_M + jX_M$ – імпеданс механічної сторони перетворювача (r_M та X_M – відповідно його активна та реактивна складові); n – коефіцієнт електромеханічної трансформації; $r_S = \alpha(\rho c)_c S$ – активна складова опору випромінювання; $(\rho c)_c$ – хвильовий опір середовища, в яке відбувається випромінювання; S – площа випромінювача, α – безрозмірний коефіцієнт активної складової опору випромінювання приладу.

При роботі навантаженого випромінювача поза резонансом завжди потрібні більші робочі напруги, ніж на резонансі, оскільки механічний опір Z_M збільшується по мірі віддалення від частоти резонансу. Для випадку роботи на резонансній частоті вираз (1) набуває вигляду:

$$U = \sqrt{\frac{W_a \cdot r_M^2}{n^2 \cdot r_S}} = \sqrt{\frac{W_a \alpha (\rho c)_c S}{\eta_{a/m}^2 \cdot n^2}}, \quad (2)$$

де $\eta_{a/m} = \frac{r_S}{r_M}$ – акустико-механічний коефіцієнт корисної дії випромінювача (к.к.д.).

Механічні напруження в активному елементі визначаються співвідношенням:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2(\rho c)_k^2}{\alpha(\rho c)_c} B_1^2 W_a}, \quad (3)$$

де $(\rho c)_k$ – хвильовий опір п'єзокераміки; B_1 – коефіцієнт, що залежить від типу перетворювача форми його коливань (для пульсуючого циліндричного перетворювача $B_1 = 1$).

Аналіз співвідношень (2) і (3) показує, що розігрів акустичного приладу при випромінюванні визначається величиною акустико-електричного к.к.д., а точніше його акустико-механічною складовою і величиною випромінюваної потужності.

Відомо [1, 2, 4], що при роботі в напружених режимах сучасні випромінюючі акустичні прилади можуть розігріватись до температур, більших за 100°C . В той же час температура розігріву активних елементів із п'єзокераміки, що допускається без втрати п'єзоефекту, становить для п'єзокераміки ЦТС біля 100°C , а для п'єзокераміки ТБК-3 – $60-65^\circ\text{C}$. Для більшості полімерних матеріалів температура розігріву не повинна перевищувати 60°C .

До конструкційних елементів, які безпосередньо сполучаються з активним елементом в конструкціях електроакустичних приладів різних типів, відносяться шари герметизуючих, електроізоляційних та армуючих матеріалів.

Розтягуючі механічні температурні напруження σ_T , що виникають в елементах конструкцій, пропорційні різниці значень температур спряжених деталей ΔT та значень коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів деталей α_j :

$$\sigma_T = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T E_{Ю},$$

де $E_{Ю}$ – модуль Юнга матеріалу.

Для конструкцій електроакустичних приладів найбільш вразливими з токи зору появи температурних напружень є конструкційні елементи, які сполучаються з активним п'єзокерамічними елементами. В режимі випромінювання звуку саме п'єзокераміка є джерелом виділення теплової енергії в конструкції приладу, кількість якої залежить від акустико-електричного к.к.д. та випромінюваної акустичної потужності.

2. Температурні напруження, які виникають в конструкціях перетворювачів, герметизованих гумо-металевими шарами

Розглянемо конструкцію циліндричного перетворювача (рис. 1), який складається з п'єзокерамічного активного елемента 3, зовнішня 1 і внутрішня 5 герметизуючі оболонки якого виконані у вигляді металевих бандажів, насаджених на активний елемент через шари гуми 2, 4, попередньо розтягнуті вздовж осі циліндра.

При зміні температури в багат шаровому циліндрі слід очікувати появи температурних напружень, оскільки шари в конструкції приладу з'єднані без зазорів, а коефіцієнти температурного розширення п'єзокераміки і металу (титану) майже в 100 разів менші коефіцієнта температурного розширення гуми [5]. Найбільшу небезпеку являють розтягуючі напруження в активному елементі, які виникають при нагрівання конструкції і залежать від величини модуля пружнос-

ті гуми в конструкції, що суттєво відрізняється від рівноважного модуля пружності матеріалу.

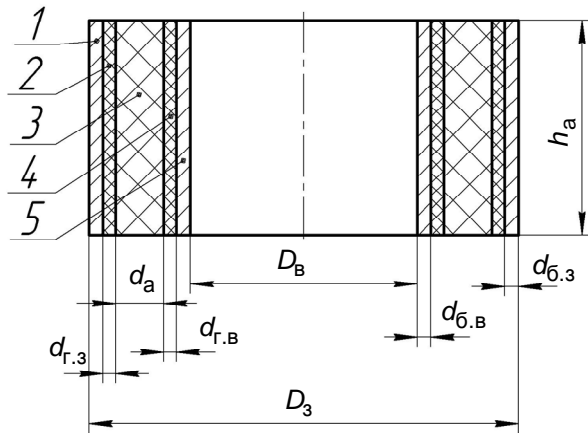


Рис. 1. Конструкція циліндричного перетворювача

Співвідношення, яке встановлює зв'язок між модулем пружності гумової деталі в конструкції $E_{г.к}$, рівноважним модулем пружності матеріалу $E_г$, коефіцієнтом форми Φ і коефіцієнтом ζ , який залежить від типу гуми та умов тертя по опорним поверхням, має вигляд:

$$E_{г.к} = E_г (1 + \zeta \Phi)$$

Коефіцієнт Φ є відношенням площ деталей, стичних з металевою оболонкою і відкритою поверхнею гумової оболонки. Для циліндричних деталей $\Phi = 0,5 \frac{h_a}{d_3}$, де h_a – висота активного елемента; d_3 – радіальний зазор між бандажем і активним елементом.

Якщо гумова оболонка приклеєна або привулканізована до активного елемента, коефіцієнт ζ стає сталим (порядку 4,7) і тоді, незалежно від типу гуми, відношення між $E_{г.к}$ і $E_г$ визначається вказаним значенням коефіцієнта ζ і відповідною величиною Φ .

При значеннях $\frac{h_a}{d_3} \gg 1$ гумова оболонка,

приклеєна або привулканізована до жорстких циліндричних поверхонь, практично знаходиться в замкнутому просторі і її модуль пружності в конструкції, що працює на стиснення, може бути близьким по величині до об'ємного модуля пружності гуми. Температурні механічні напруження $\sigma_{Тa}$, які виникають в активному елементі випромінювача у вигляді п'ятишарового циліндру, визначаються за формулою:

$$\sigma_{Тa} = (\rho_{к.3} - \rho_{к.в}) \frac{r_a}{d_a},$$

де $\rho_{к.3}$ і $\rho_{к.в}$ – зовнішній і внутрішній контактний тиск на активний елемент радіусом r_a і товщи-

ною d_a , обумовлений зміною температури конструкції.

При повільному нагріванні багат шарової конструкції, що розглядається, коли температурне поле мало відрізняється від однорідного, радіальний тиск $\rho_{к.3}$ на активний елемент становить:

$$\rho_{к.3} = E_{г.к} \frac{\Delta_{б.3} - \Delta_a - \alpha_{г.3} \Delta T \cdot d_{г.3}}{d_{г.3} (1 + \alpha_{г.3} \Delta T)},$$

де $\Delta_{б.3}$ – подовження радіусу зовнішнього бандажу при нагріванні; Δ_a – подовження радіусу активного елемента при нагріванні; $\alpha_{г.3}$ – коефіцієнт температурного розширення гуми при заданій температурі; $\Delta T = T - T_0$, де T і T_0 – кінцева і початкова температури; $d_{г.3}$ – товщина зовнішнього шару гуми.

В свою чергу:

$$\Delta_{б.3} = \left(\alpha_{б.3} \cdot \Delta T + \rho_{к.3} \frac{r_{б.3}}{\alpha_{б.3} \cdot E_{б.3}} \right) r_{б.3},$$

де $r_{б.3}$ – радіус зовнішнього бандажу; $E_{б.3}$ – модуль пружності матеріалу зовнішнього бандажу; $\alpha_{б.3}$ – коефіцієнт температурного розширення зовнішнього бандажу;

$$\Delta_a = \left(\alpha_a \cdot \Delta T + (\rho_{к.в} - \rho_{к.3}) \frac{r_a}{d_a E_a} \right) r_a,$$

де α_a – коефіцієнт температурного розширення активного елемента, E_a – приведений модуль пружності активного елемента;

Тиск на внутрішню поверхню активного елемента буде:

$$\rho_{к.в} = E_{г.к} \frac{\Delta_a - \Delta_{б.в} - \alpha_{г.в} \cdot \Delta T \cdot d_{г.в}}{d_{г.в} (1 + \alpha_{г.в} \cdot \Delta T)},$$

де $\Delta_{б.в}$ – подовження радіусу внутрішнього бандажу при нагріві;

$$\Delta_{б.в} = \left(\alpha_{б.в} \cdot \Delta T - \rho_{к.в} \frac{r_{б.в}}{d_{б.в} \cdot E_{б.в}} \right) r_{б.в},$$

де $\alpha_{б.в}$ – коефіцієнт температурного розширення матеріалу внутрішнього бандажу; $r_{б.в}$, $d_{б.в}$, $E_{б.в}$ – радіус, товщина та модуль пружності внутрішнього бандажу відповідно.

Виконавши ряд перетворень з використанням всіх наведених рівнянь, для оцінки різниці контактних тисків $\rho_{к.в} - \rho_{к.3}$ одержимо наступну нерівність:

$$\rho_{к.в} - \rho_{к.3} \leq \frac{E_{б.в} h_a \left[\alpha_{б.в} \Delta T \left(\frac{r_{б.в}}{d_{г.в}^2} + \frac{r_{б.3}}{d_{г.3}^2} \right) - \alpha_a \Delta T r_a \left(\frac{1}{d_{г.в}^2} + \frac{1}{d_{г.3}^2} \right) - \alpha_{г.в} \Delta T \left(\frac{1}{d_{г.3}} - \frac{1}{d_{г.в}} \right) \right]}{2 + \frac{r_a^2 E_{б.в} d h_a}{4 d_a E_a} \left(\frac{1}{d_{г.в}^2} + \frac{1}{d_{г.3}^2} \right)}$$

де $\alpha_{б.3} = \alpha_{б.в} = \alpha_{б}$; $\alpha_{г.3} = \alpha_{г.в} = \alpha_{г}$

На рис. 2 наведена розрахункова залежність зміни σ_T від часу нагріву конструкції перетворювача.

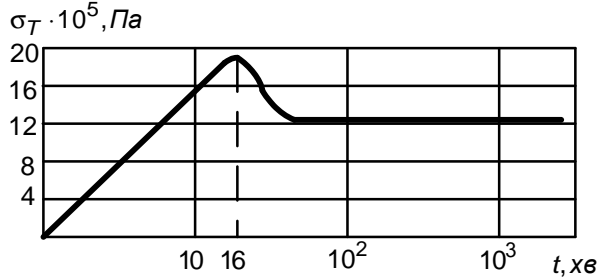


Рис. 2. Залежність зміни σ_T від часу нагріву конструкції перетворювача

Висновки

Таким чином, головною позитивною якістю запропонованого розрахункового методу є можливість виявлення основних закономірностей в конструкції акустичного приладу між температурними напруженнями, розмірами і термодружними властивостями вхідних конструкційних матеріалів.

Література

1. *Подводные* электроакустические преобразователи. (Расчет и проектирование): Справочник / В.В. Богородский, Л.А. Зубарев, Е.А. Корепин, В.И. Якушев. – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
2. *Хмелев В.Н., Попова О.В.* Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.
3. *Холопов Ю.В.* Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
4. *Леонов Г.В., Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Хмелев М.В., Цыганок С.Н.* Исследование изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе УЗ воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды // электронный журнал "Исследовано в России". – 2005. – 135. – С. 1359-1367. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/135.pdf>
5. *Физические величины: Справочник* / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.