

УДК 534.232

О.І. Дрозденко

## Розрахункове забезпечення електричної міцності конструкцій електроакустичних перетворювачів, герметизованих полімерними матеріалами

Рассмотрена зависимость электрической прочности электроакустических преобразователей от условий эксплуатации и способов герметизации. Разработаны расчетные модели для оценки процессов диффузии в электроакустических преобразователях с различными вариантами герметизации и защиты от электрического пробоя. По моделям установлены зависимости скорости процессов диффузии от свойств используемых материалов.

Electric strength of electro-acoustic converters dependence on service conditions and hermetic encapsulation modes is considered. Settlement models for diffusion processes estimation in electro-acoustic converters with various variants of hermetic encapsulation and protection against voltage failure are developed. The models dependences of diffusion processes speed on properties of used materials are established.

**Ключові слова:** електроакустичний перетворювач, конструкційні способи захисту, електрична міцність, опір ізоляції, вологозахист, герметизація.

### Вступ

Електроакустичні прилади є електромеханічними коливальними системами, в яких створення акустичних полів відбувається в результаті взаємодії електричних і механічних полів. Тому конструкції цих приладів під час їх розробки повинні розраховуватись не тільки на механічну, а й на електричну міцність.

Електрична міцність, поряд з механічною міцністю [1] та температурними механічними напруженнями [1,2] є одним із внутрішніх факторів електроакустичних приладів, які обмежують їх енергетичні можливості. Особливо це стосується конструкцій випромінювальних електроакустичних приладів, в яких для створення великих інтенсивностей задіяні потужні електричні поля. Якщо до того ж ці конструкції призначені для роботи протягом тривалого часу в рідинах, то забезпечення заданої електричної міцності суттєво ускладнюється порівняно з розробкою конструкцій приладів, які працюють у повітрі.

Розробка методів розрахунку електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів, які працюють в рідині, є складним теоретичним і експериментальним пошуковим процесом [3].

Метою роботи є визначення дії зволоження ізоляції, на зниження електричної міцності активних елементів та її врахування під час розробки конструкцій електроакустичних приладів.

### 1. Вимоги до електричної міцності електроакустичних перетворювачів

Вимоги забезпечення електричної міцності для конструкцій електроакустичних приладів, які працюють в режимах прийому та випромінювання звуку, принципово відрізняються.

В конструкціях прийомних електроакустичних приладів основним завданням електроізоляції є забезпечення певного електричного опору в умовах експлуатації та виключення її впливу на вид амплітудно- та фазочастотних характеристик перетворювачів. Оскільки, як правило, вони працюють на частотах  $\omega_n$ , що лежать значно нижче резонансних, то цього можливо досягти за умов

$$R_{\text{ел,вт}} \gg \frac{1}{\omega_n C_{\text{ел}}^{\xi}} \text{ і } R_{\text{п,с}} \gg \frac{1}{\omega_n C_{\text{ел}}^{\xi}}, \quad (1)$$

де  $R_{\text{ел,вт}}$  – опір втрат електроакустичного приладу;  $C_{\text{ел}}^{\xi}$  – ємність активного елемента;  $R_{\text{п,с}}$  – опір активного елемента і елементів електроізоляції постійному струму.

У випромінювальних приладах, які, як правило, працюють на резонансних частотах, вимога до повного опору електричних втрат

$$R_{\text{ел}} \gg \frac{r_m}{n^2}, \text{ де } r_m \text{ – механічний опір приладу, а}$$

$n$  – його коефіцієнт електромеханічної трансформації, зазвичай виконується відносно легко. Однак, у випромінювальних електроакустичних приладах, збуджуються електричні поля достатньо великої напруженості. Чисельні значення напруги збудження  $U$  досягають величин до 3000 В при відстані між електродами 8 – 15 мм. Очевидно, що в цих випадках існує висока ймовірність пробою використаних електроізоляційних матеріалів. У конструкціях цих приладів повинні бути вжиті заходи щодо підтримки необ-

хідного рівня електричної міцності:  $U < U_{гр}$ , де  $U_{гр}$  – граничне значення електричної міцності електроакустичного приладу. Таким чином електрична ізоляція конструкцій випромінювальних електроакустичних приладів повинна відповідати вимогам:

$$[R_{ел} > R_{ел,гр}; U < U_{гр}]P(t), \quad (2)$$

де  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи, а

$$R_{ел,гр} = (30 \div 100) \frac{r_M}{n^2}.$$

В процесі експлуатації електроакустичних приладів в рідині однією з поширених причин втрати працездатності приладів є погіршення електричних параметрів приладів через зволоження їх активних елементів. Зокрема, опір міжелектродної ізоляції (внутрішній опір) електроакустичного приладу  $R_0$  стає меншим 0,5 – 1,0 МОм, що приводить до виникнення часткових розрядів небезпечної інтенсивності між електродами. Пояснюється це однією з можливих двох причин – руйнуванням герметичної оболонки електроакустичного приладу або зволоженням електричної ізоляції активного елемента в результаті дифузії рідини крізь полімерні деталі герметизуючої оболонки.

Ідеальними матеріалами для герметизації є метали і скло [4], оскільки вони непроникливі для молекул рідин. Метали широко використовуються для герметизації активних елементів, а використанню скла перешкоджає його крихкість – воно руйнується при деформації більше 0,1%.

Здебільшого в конструкціях електроакустичних приладів є елементи, які виконуються тільки з полімерних матеріалів. Це підбандажна ізоляція, ізоляція від корпусу, ізоляція монтажу і струмоводів. Існують конструкції електроакустичних приладів, в яких тільки ввід електричного кабелю герметизовано за допомогою полімерів, а вся інша герметизуюча оболонка виконана з металу. Однак реалізація таких перетворювачів має суттєві технологічні труднощі, пов'язані із забезпеченням необхідної гнучкості і міцності кріплень активних елементів електроакустичних приладів.

Інформацію щодо параметрів матеріалів, які застосовуються для герметизації гідроакустичних перетворювачів можна знайти в [1].

Таким чином, для забезпечення електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів необхідно мати інформацію про зміну параметрів матеріалів, які використовуються для електроізоляції та герметизації в умовах їх тривалої експлуатації. При зниженні електричної міцності внаслідок зволоження ізоляції його активного елемента необхідним є дотримання вимог (1) і (2).

## 2. Основні підходи до забезпечення електричної міцності конструкцій електроакустичних перетворювачів, обумовленої зволоженням ізоляції активних елементів

Умовою забезпечення електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів є визначення концентрації  $C$  пари води у внутрішньому об'ємі конструкцій, яка повинна бути меншою гранично допустимою  $C_{гр}$ , щоб забезпечити з вірогідністю  $P_{герм}(t_{експ})$  нормальне функціонування електроакустичного приладу  $[C < C_{гр}]_{P_{герм}(t_{експ})}$ .

Процеси руху молекул пари в рідині і через границю розподілу рідини з іншим середовищем за даних граничних і початкових умов описуються за допомогою рівняння дифузії:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 C_i, \quad (3)$$

де  $C_i$  – концентрація пари;  $D_i$  – коефіцієнт дифузії пари в  $i$ -тому середовищі;  $t$  – час;  $\nabla$  – оператор Лапласа.

У випадку стаціонарного рівноважного стану системи "рідина-пара"  $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$  і концентрації пари над рідиною в повітрі  $C_2|_{x=0}$  і всередині неї

$C_1|_{x=0}$  однакові  $C_1(x) = C_2(x)$ . При нестационарному стані дифузійні потоки пари на межі розподілу рідини з іншим середовищем становлять

$$D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big|_{x=0}.$$

Концентрація пари рідини в будь-якому середовищі не може бути більшою граничної за даних температури і тиску, оскільки при досягненні її різко збільшується вірогідність співударів молекул пари, а відтак і її конденсації. Кількість вологи, яка міститься в повітрі, виражається, як через абсолютну вологість, тобто концентрацію пари рідини в повітрі  $C$ , так і через відносну вологість, тобто через відношення існуючої вологості  $C$  до граничної  $C_{гр}$  за даної температури  $\varphi = C/C_{гр}$  [4].

При відсутності порушень суцільності полімерних оболонок пара рідини проникає крізь них за законами дифузії. При цьому концентрація пари рідини в будь-якій точці конструкції електроакустичного приладу може бути визначена із рішення рівняння дифузії (3) за відповідних граничних і початкових умовах. У зв'язку з тим, що товщина полімерних оболонок майже завжди є відносно малою, а відношення радіусів зовнішніх

поверхонь  $r_3$  до внутрішніх  $r_B$  звичайно становить  $r_3/r_B \leq 1,4$  з достатньою для практики точністю [4] всі полімерні оболонки конструкцій електроакустичних приладів під час аналізу дифузних явищ можуть розглядатись як пласкі. Площі їх поверхонь є рівними площам отворів, які вони закривають, а товщини – рівними товщинам реальних оболонок. При цьому рівняння (3) замінюється простішим одномірним рівнянням:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} . \quad (4)$$

Для розрахункового забезпечення розробки конструкцій електроакустичних приладів в частині оцінки протидії процесам дифузії пари рідини потрібно розробити розрахункові моделі цих конструкцій. З точки зору граничних і початкових умов, які реалізуються в сучасних конструкціях електроакустичних приладів, а також механізмів дії пари рідини на електроізоляційні характеристики цих приладів, конструкції електроакустичних приладів можливо поділити на наступні групи:

1. Компенсовані конструкції, герметизовані полімерними або полімерно-металевими оболонками за наявності їх адгезії до активного елемента у вигляді п'єзокерамічного тіла.
2. Розвантажені, силові і компенсовані маслозаповнені конструкції, та конструкції, герметизовані полімерними оболонками, які не мають адгезії до активного елемента.
3. Розвантажені, силові і компенсовані маслозаповнені конструкції за наявності в їх складі спеціально вбудованих осушувачів (наприклад, патронів з силікагелем).

Якщо конструкція електроакустичного приладу включає в себе кілька елементів герметизації, які відображаються різними розрахунковими моделями, то результуюча концентрація пари води  $C_\Sigma$  у її внутрішньому об'ємі  $V$  дорівнює відношенню повної кількості пари рідини, яка пройшла скрізь всі елементи герметизації  $Q_\Sigma$ , до внутрішнього об'єму електроакустичного приладу:  $C_\Sigma = Q_\Sigma / V$ .

Таким чином, електричний стан конструкції електроакустичного приладу визначається концентрацією пари рідини в ній. Остання може бути знайдена як результат рішення диференційного рівняння дифузії (4) для відповідної розрахункової моделі.

Щоб пов'язати значення концентрації пари зі значенням опору постійному струму  $R_{п,с}$  і тангенсом діелектричних втрат  $tg\delta$  скористаємось експериментально отриманою залежністю [4] на прикладі п'єзокераміки ЦТСНВ-1, яка наведена на рис. 1.

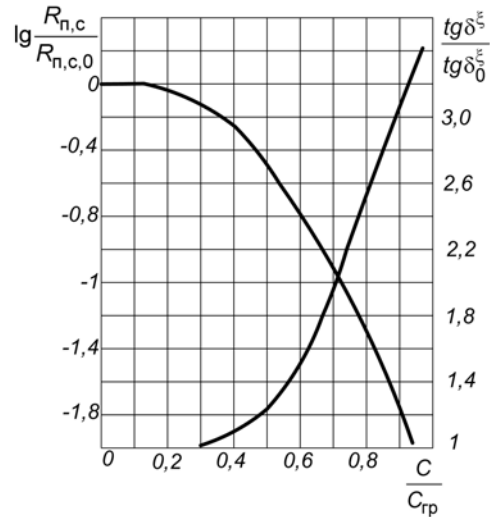


Рис. 1. Залежність опору постійному струму  $R_{п,с}$  і тангенса діелектричних втрат  $tg\delta$  для п'єзокераміки ЦТСНВ-1, з параметрами  $R_{п,с,0} = 2,43 \cdot 10^{11} \text{ Ом}$ ,  $tg\delta_0^\xi = 2\%$

Розглянемо методи розрахунків концентрації пари для конструкцій електроакустичних приладів першої групи.

### 3. Розрахункова модель для оцінювання процесів дифузії пари рідини в конструкціях електроакустичних приладів за наявності адгезії полімерних матеріалів до активного елемента

Відмінною особливістю цієї моделі є те, що в процесі зволоження шару полімеру здійснюється зниження його електричного опору  $R_{ел}(C)$  і електричної міцності  $U_{пр}(C)$ .

Для рівняння дифузії у вигляді (4) граничні і початкові умови (рис.2) мають вигляд: концентрація пари в робочому середовищі  $C = C_1$  при  $x \leq 0$  для всіх  $t$ ; концентрація пари в полімері  $C = C_0$  при  $0 < x < l_1$  і  $t = 0$ ; концентрація пари в п'єзокераміці  $C_3 = 0$ , якщо  $x > l_1$  для всіх  $t$ .

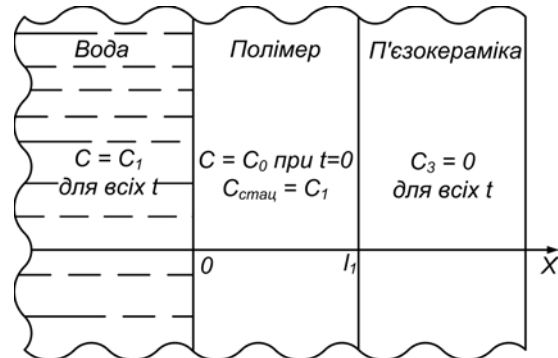


Рис. 2 Модель перетворювачів за наявності адгезії герметизуючої оболонки до п'єзокерамічного активного елемента

Рішення рівняння дифузії шукаємо у вигляді:

$$C(x, t) = C_1 + C_2(x, t).$$

Граничні і початкові умови, що відповідають цьому запису:

$$C_2|_{x=0} = 0 \text{ для всіх } t; C_2|_{x=l; t=0} = C_0 - C_1;$$

$$\left. \frac{\partial C_2}{\partial x} \right|_{x=l} = 0.$$

Подамо концентрацію пари  $C_2(x, t)$  в полімері у вигляді  $C_2(x, t) = X(x)T(t)$  [5]. Тоді

$$DX''(x)T(t) = T'(t)X(x); \frac{DX''(x)}{X(x)} = \frac{T'(t)}{T(t)} = -\lambda, \text{ або}$$

$$X''(x) + \frac{\lambda}{D} X(x) = 0 \text{ і } T'(t) + \lambda T(t) = 0.$$

Рішення останніх рівнянь мають вигляд:

$$X(x) = A \cos \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \cdot x + B \sin \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \cdot x; T(t) = E e^{-\lambda t};$$

$$C_2(x, t) = \left( A_1 \cos \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \cdot x + B_1 \sin \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \cdot x \right) e^{-\lambda t}.$$

Знайшовши невідомі коефіцієнти  $A_i$  і  $B_i$  наведених розкладів із граничних і початкових умов, маємо:

$$C(x, t) = C_1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4(C_0 - C_1)}{\pi(2n+1)} \times \sin \frac{\pi x(2n+1)}{2l_1} e^{-\left[ \frac{\pi(2n+1)}{2l_1} \right]^2 Dt} \quad (5)$$

Аналіз співвідношення (5) показує, що концентрація пари у товщі полімеру зростає тим швидше, чим більший член  $D/l_1^2$ , тобто чим більший коефіцієнт дифузії і чим менший квадрат товщини полімерної оболонки. При  $t \rightarrow \infty$  концентрація  $C(x)$  по всьому об'єму полімеру прямує до  $C_1$ .

На рис. 3 наведені розраховані залежності відносних концентрації пари рідини в полімері  $\frac{C(l_1)}{C_1} = f_1(t)$  і внутрішнього опору конструкції електроакустичного приладу сталому струму  $\frac{R_{п,с}(l_1)}{R_{п,с,0}(l_1)} = f_2(t)$ . Як бачимо, опір приладу сталому струму знижується завдяки поступовому насиченню полімерної оболонки парою рідини.

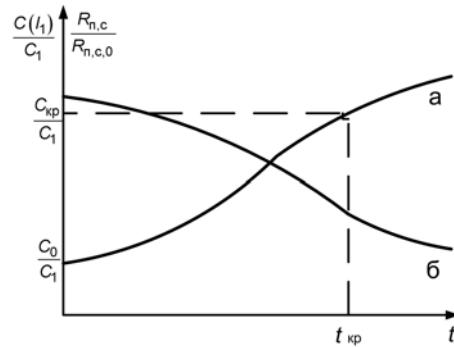


Рис. 3. Залежності концентрації пари рідини в полімері (а) та внутрішнього опору електроакустичного приладу сталому струму (б)

## Висновки

Обґрунтовано, що для забезпечення електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів необхідно мати інформацію щодо зміни параметрів матеріалів, які використовуються для електроізоляції та герметизації в умовах їх тривалої експлуатації.

Встановлено, що електричний стан конструкції електроакустичного приладу визначається концентрацією пари рідини в ній, яка може бути знайдена як результат розв'язання диференціального рівняння дифузії для відповідної розрахункової моделі.

Запропоновано розрахункову модель оцінки процесів дифузії пари рідини в конструкціях електроакустичних приладів за наявності адгезії полімерних матеріалів до активного елемента.

## Література

1. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). Навчальний посібник. - Кіровоград: Імекс-ЛТД, 2006.- 448 с.
2. Дрозденко О.І. Метод розрахунку температурних напружень, які виникають в конструкціях п'єзоелектричних перетворювачів, герметизованих гумо-металевими шарами / О.І. Дрозденко // Електроніка і зв'язь. - 2010.- №3(56). - С. 135-138
3. Подводные электроакустические преобразователи. (Расчет и проектирование): Справочник / В.В. Богородский, Л.А. Зубарев, Е.А. Корепин, В.И. Якушев. - Л.: Судостроение, 1983. - 248 с.
4. Доценко Н.С., Соболев В.В. Долговечность элементов радиоэлектронной аппаратуры (влияние влаги). - Л.: Энергия, 1973. - 160с.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: Учеб. пособие. - М.: Изд-во МГУ, 1999. - 798 с.