

УДК 621.382

**В.С. ОСАДЧУК, О.В. ОСАДЧУК, Л.В.КРИЛИК, М.В.ЄВСЄЄВА**

## **ЄМНІСНИЙ СЕНСОР ВОЛОГОСТІ ГРЕБІНЦЕВОЇ СТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Вінницький національний технічний університет 95,  
Хмельницьке шосе, Вінниця, Україна*

**Анотація.** Розроблено гребінцеву структуру вологочутливого елемента на базі ситалової підкладки розміром 0,7×0,9 см, на поверхні якої нанесена плівка міді, що утворює обкладки конденсатора у вигляді меандру. На основі гребінцевої двошарової структури вологочутливого елемента, виходячи з його геометрії та природи солей NaCl та BaCl<sub>2</sub> захищених вологопоглинаючою плівкою поліметилметакрилату, отримані аналітичні залежності ємності структури від дії вологи.

**Аннотация.** Разработана гребенчатая структура влаготувствительного элемента на базе ситаловой подложки размером 0,7×0,9 см, на поверхности которой нанесенная пленка меди, что образует обкладки конденсатора в виде меандра. На основе гребенчатой двухслойной структуры влаготувствительного элемента, исходя из его геометрии и природы солей NaCl и BaCl<sub>2</sub> защищенных влагопоглощающей пленкой полиметилметакрилата, полученные аналитические зависимости емкости структуры от действия влаги.

**Abstract.** An interdigitated structure of a humidity-sensitiv element on an insulating substrate sized 0.7×0.9 cm with a copper film on its surface which forms a meander-shaped capacitor has been developed. Based on the interdigitated two-layer structure of a humidity-sensitiv element due to its geometry and the natyre of NaCl and BaCl<sub>2</sub> salts protected by a polymethylmethacrylate film, some analytic dependencies of the structure capacitance of the effects on humidity have been obtained.

**Ключові слова.** Вологість. Суміш. Гігроскопічна сіль. Поліметилметакрилат.

### **Вступ**

Практично всі органічні полімери змінюють свої фізико-хімічні властивості при сорбції вологи, що дає змогу використовувати багато з них у сенсорах вологи, в тому числі кондуктометричного та ємнісного типів. Органічна полімерна плівка в таких сенсорах може служити або самостійним вологочутливим агентом, або з добавками неорганічних вологочутливих сполук (звичайно солей хлористого літію чи хлористого

кальцію) чи негігроскопічних провідних частинок (дрібнодисперсного вуглецю, золота, срібла, паладію та інших).

В якості вологочувливих покриттів сенсорів можуть використовуватися акрилати, полімери метакрилату, поліакріламід, поліетиленіміди, гідроксилцелюлоза, продукти співполімеризації хлорвмісних полімерів (наприклад, хлорований поліпропілен) і поліамідної смоли, кремнійорганічні полімери, що містять аміногрупи [1, 2].

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, в яких вологість перетворюється у частоту, дозволяє значно підвищити чутливість, точність вимірювання вологості, спростити схеми подальшої обробки інформації. В цьому випадку необхідно використовувати вологочувливий елемент у вигляді ємності. Проте дослідження ємнісних властивостей вологочувливих елементів на основі органічної полімерної плівки з різними добавками виконані не в повній мірі.

### **Теоретичні та експериментальні дослідження**

Якщо матеріал складається із суміші компонентів з різним  $\epsilon$ , то загальну поляризацію матеріалу можна знайти як суму поляризацій компонентів. Встановлено, що всі суміші в залежності від розподілу компонентів можна поділити на три групи:

- структуровані суміші, у яких компоненти створюють деякі упорядковані структури;
- матричні суміші, в яких одні компоненти являють собою суцільну матрицю з вкрапленнями інших компонентів;
- статичні суміші, в яких компоненти розподілені хаотично і рівномірно по взаємному розташуванню.

В деяких випадках група суміші залежить від об'ємного вмісту компонентів. Діелектричні властивості матеріалу в багатьох випадках залежать не від зміни структури, а від вмісту вологи, що знаходиться в даному матеріалі. Формою зв'язку між водою і матеріалом визначається вплив вмісту води на діелектричні властивості матеріалу. Характерним у нашому випадку є те, що вологочутливий шар відноситься до структурованих сумішей. Першим шаром якого є суміш проміжного типу, тобто зволожена сіль лужного або лужно-земельного металів, властивості якої задовільно описуються емпіричним рівнянням [3]

$$\lg \varepsilon_{СПТ} = V_1^a \lg \varepsilon_1 + (1 - V_1^a) \lg \varepsilon_2, \quad (1)$$

де  $a = 0,5 \div 1$ ;

$V_1$  – об'ємна доля сухого компоненту (солі);

$\varepsilon_1$  – діелектрична стала сухого компоненту;

$(1 - V_1^a)$  – об'ємна доля води;

$\varepsilon_2$  – діелектрична стала води.

Завдяки зміні коефіцієнта  $a$  дане рівняння охоплює усі типи неупорядкованих сумішей.

Знайдемо об'ємні долі компонентів, тобто  $V_{\text{доля солі}}$ , а також  $V_{\text{доля } H_2O}$ , для цього визначимо загальний об'єм, який займають ці речовини, тобто

$$V_{\text{солі}} + V_{H_2O} = V_{\text{заг}}, \quad (2)$$

$$V_{\text{доля солі}} = \frac{V_{\text{солі}}}{V_{\text{заг}}}, \quad (3)$$

$$V_{\text{доля } H_2O} = \left(1 - V_{\text{доля солі}}^a\right), \quad (4)$$

$$V_{\text{солі}} = S_M \sigma_{\text{солі}}, \quad (5)$$

$$S_M = l \times b, \quad (6)$$

де  $S_M$  – площа меандру, мм<sup>2</sup>;

$\sigma_{\text{соли}}$  – товщина сольового покриття, мкм;

$l, b$  – довжина та ширина меандру, мм.

Визначимо об'єм води  $V_{H_2O}$

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}, \quad (7)$$

де  $m_{H_2O}$  – маса води, г;

$\rho_{H_2O}$  – густина води, г·см<sup>-3</sup>.

$$m_{H_2O} = \chi G, \quad (8)$$

$$\chi = \delta \frac{P_v}{P - p_v}, \quad (9)$$

$$G = \frac{273,2 \cdot M_{II} P V}{101,325 \cdot 22,4(273,2 + T)} = \frac{0,1204 P M_{II} V}{273,2 + T}, \quad (10)$$

де  $\chi$  - величина, яка враховує зв'язок між масовим відношенням вологи і тиском пари [4];

$G$  – маса сухого повітря, г [5];

$\delta = \frac{M_{H_2O}}{M_{II}}$  - відносна маса водяної пари по відношенню до сухого повітря

при однакових тисках і температурах;

$M_{H_2O} = 18,015$ ,  $M_{II} = 29$  - молярні маси водяної пари та сухого повітря, г/моль;

$p_v$  - парціальний тиск пари при температурі  $T$ , Па;

$P$  - тиск повітря 101325 Па, або 101,325 кПа (760 мм рт.ст.).

Температура вологого термометра і тиск пари пов'язані таким виразом [4]

$$p_v = p_s - AP(T - T_w), \quad (11)$$

$$A = \frac{c_{p\Pi}}{\delta L_{T_w}} \cdot \frac{P - p_s}{P}, \quad (12)$$

де  $p_s$  - тиск насиченої пари при температурі  $T$ , Па;

$A$  - психрометрична стала, яка при  $T_w = 20^\circ\text{C}$  становить 0,00064;

$T$  - температура навколишнього середовища,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_w$  - температура вологого термометра,  $^\circ\text{C}$ ;

$c_{p\Pi}$  - питома теплоємність сухого повітря (1,006 кДж/кг при  $T = 20^\circ\text{C}$ );

$L_{T_w}$  - прихована теплота пароутворення при температурі вологого термометра  $T_w$ , кДж/кг;

$V$  - об'єм, який займає дана маса газу,  $\text{дм}^3$ .

Вираз (11) підставимо в (9) і отримаємо співвідношення [4]

$$\chi = \delta \cdot \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right). \quad (13)$$

З врахуванням (8) та значення  $\rho_{H_2O}$  визначимо об'єм води

$$V_{H_2O} = \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}. \quad (14)$$

Тоді  $V_{заг}$  визначиться як

$$V_{заг} = \left( S_M \sigma_{соли} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}} \right). \quad (15)$$

У цьому випадку вираз (3) з врахуванням (5) та (15) набуде вигляду

$$V_{доля\ соли} = \frac{S_M \sigma_{соли}}{\left( S_M \sigma_{соли} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}} \right)}. \quad (16)$$

Загальний вираз для визначення діелектричної сталої суміші проміжного  $\epsilon_{СПТ}$  типу має вигляд

$$\lg \epsilon_{СПТ} = V_{\text{доля соли}}^a \lg \epsilon_{\text{соли}} + k \left(1 - V_{\text{доля соли}}^b\right) \chi \lg \epsilon_{H_2O}, \quad (17)$$

де  $a = 0,5 \div 1$ ,  $b = 0,5 \div 1$  при умові, що  $a < b$ ,  $k = 1 \div 5$ .

З врахуванням (4), (9), (13) та (16) вираз (17) набуває вигляду

$$\begin{aligned} \lg \epsilon_{СПТ} = & \left( \frac{S_M \sigma_{\text{соли}}}{S_M \sigma_{\text{соли}} + \frac{G \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^a \lg \epsilon_{\text{соли}} + k \left( 1 - \left( \frac{S_M \sigma_{\text{соли}}}{S_M \sigma_{\text{соли}} + \frac{G \chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^b \right) \times \\ & \times \delta \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) \lg \epsilon_{H_2O}. \end{aligned} \quad (18)$$

Другий шар - шар поліметилметакрилату, що є сумішшю матричного типу з дискретно розподіленими мікрочастинками вологи.

Для матричних сумішей часто застосовується формула Оделевського [3]

$$\epsilon_{\text{матр}} = \epsilon_{\text{пол}} \cdot \left( 1 + \frac{V_{\text{доля } H_2O}}{\frac{1 - V_{\text{доля } H_2O}}{3} + \frac{\epsilon_{\text{пол}}}{\epsilon_{H_2O} - \epsilon_{\text{пол}}}} \right), \quad (19)$$

де  $\epsilon_{\text{пол}}$  - діелектрична стала поліметилметакрилату;

$\epsilon_{H_2O}$  - діелектрична стала води;

$V_{\text{доля}H_2O}$  - об'ємна доля води.

Тепер перейдемо до визначення об'ємних долей компонентів, тобто  $V_{\text{доля}H_2O}$ , для цього визначимо загальний об'єм  $V_{\text{заг}}$ , який займають ці речовини, тобто

$$V_{\text{пол}} + V_{H_2O} = V_{\text{заг}}, \quad (20)$$

$$V_{\text{доля пол}} = \frac{V_{\text{пол}}}{V_{\text{заг}}}, \quad (21)$$

$$V_{\text{пол}} = S_{\text{пол}} d_{\text{пол}}, \quad (22)$$

де  $S_{\text{пол}}$  - площа поліметилметакрилату;

$d_{\text{пол}}$  - товщина шару поліметилметакрилату;

$$V_{\text{доля}H_2O} = (1 - V_{\text{доля пол}}). \quad (23)$$

З врахуванням (20), (21), (22) і (23) вираз (19) набуває вигляду

$$\varepsilon_{\text{матр}} = \varepsilon_{\text{пол}} \cdot \left( 1 + \frac{\left( 1 - \frac{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}}}{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}} + V_{H_2O}} \right)}{1 - \frac{\left( 1 - \frac{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}}}{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}} + V_{H_2O}} \right)}{3} + \frac{\varepsilon_{\text{пол}}}{\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{\text{пол}}}} \right). \quad (24)$$

Для розрахунку ємності даної структури скористаємось формулою для визначення ємності тонкоплівкового конденсатора з гребінцевою структурою [6]

$$C = (\varepsilon_{II} + 1) \varepsilon_0 l [2A_1 (N - 1) + A_2], \quad (25)$$

де  $\varepsilon_{II}$  – діелектрична стала підкладки;

$\varepsilon_0$  – діелектрична стала вакууму, Ф/м;

$N$  – число секцій;

$l, a, b$  – величини, які враховують геометрію конденсатора, мм;

$d_{II}$  – товщина підкладки, мм;

$$A_1 = 0,61(d_{II}/a)^{0,25}(b/d_{II})^{0,44},$$

$$A_2 = 0,77b/[(2N-1)(a+b)+0,41].$$

Враховуючи діелектричну сталу суміші проміжного типу (18) та суші матричного типу (24) вираз (25) набуває виду

$$C = (\varepsilon_{II} + \varepsilon_{СПТ} + \varepsilon_{матр} + 1)\varepsilon_0 l [2A_1(N-1) + A_2], \quad (26)$$

де

$$A_1 = 3(d_{II}/a)^{0,25}(b/d_{II})^{0,44}.$$

Тобто

$$C = \left( \left( \frac{S_M \sigma_{соли}}{S_M \sigma_{соли} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^a \lg \varepsilon_{соли} + \varepsilon_{пол} \left( 1 + \frac{\left( 1 - \frac{S_{пол} d_{пол}}{S_{пол} d_{пол} + V_{H_2O}} \right)}{1 - \frac{\left( 1 - \frac{S_{пол} d_{пол}}{S_{пол} d_{пол} + V_{H_2O}} \right)}{3} + \frac{\varepsilon_{пол}}{\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{пол}}} \right) + \right. \\ \left. + \varepsilon_{II} + 1 + \delta k \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) \left( 1 - \left( \frac{S_M \sigma_{соли}}{S_M \sigma_{соли} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}} \right)^b \right) \lg \varepsilon_{H_2O} \right) \times \\ \times \varepsilon_0 l [2A_1(N-1) + A_2]. \quad (27)$$

Ємнісний перетворювач вологості виготовлений на ситаловій підкладці розміром 0,7×0,9 см, на поверхні якої нанесена плівка міді, яка утворює обкладки конденсатора у вигляді меандру з відповідною



геометрією  $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$  м (рис.1). Вологочутливою плівкою, яка слугує діелектриком даного перетворювача, є двошарова структура, нижнім шаром, якої є гігроскопічна сіль, а верхнім - полімер. Для створення вологочутливої плівки використовувались розбавлені розчини солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ , які наносились на поверхню конденсатора пульверизатором на відстані 30 – 40 см в три та чотири покриття. На отримане вологочутливе покриття наносився захисний шар поліметилметакрилату

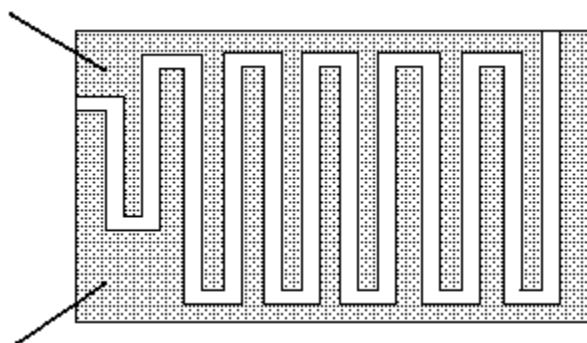


Рис. 1. Зовнішній вигляд ємнісного вологочутливого елемента гребінцевої структури

Згідно з виразом (27) була розрахована ємність вологочутливого ємнісного елемента на основі гігроскопічних солей  $\text{NaCl}$  і  $\text{BaCl}_2$ , та для двошарових структур  $\text{NaCl}$ -поліметилметакрилат і  $\text{BaCl}_2$  - поліметилметакрилат за допомогою пакету прикладних програм “Matlab 5.2”. На рис.2. показані теоретичні та експериментальні залежності ємності вологочутливих елементів на основі гігроскопічних солей та двошарових структур від зміни відносної вологості повітря в діапазоні від 30 до 100%.

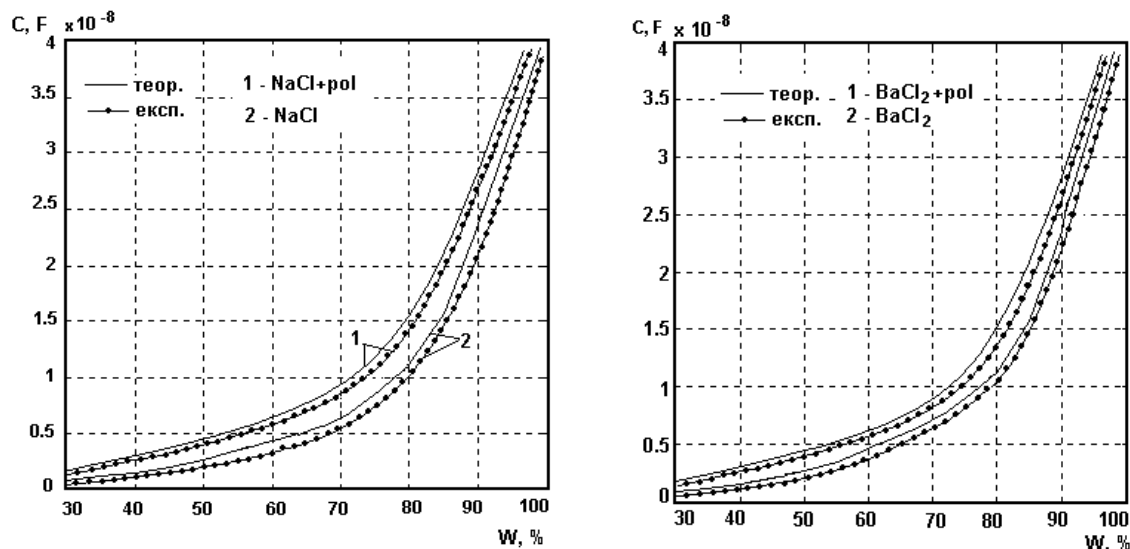


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності зміни ємності від відносної вологості навколишнього середовища вологочутливого конденсатора гребінцевої структури на основі NaCl і BaCl<sub>2</sub> та двошарових структур

### Висновки

На основі гребінцевої двошарової структури вологочутливого елемента, виходячи з його геометрії та природи солей NaCl та BaCl<sub>2</sub> захищених вологопоглинаючою плівкою поліметилметакрилату, отримані аналітичні залежності ємності структури від дії вологи. Розроблена гребінцева структура вологочутливого елемента на базі ситалової підкладки розміром 0,7×0,9 см, на поверхні якої нанесена плівка міді, що утворює обкладки конденсатора у вигляді меандру.

Експериментальні дослідження показали, що створення захисного шару, в якості полімерного покриття з метою запобігання випадіння точки роси, зменшує діапазон зміни ємності. Так, при зміні відносної вологості від 30% до 100% діапазон зміни ємності для вологочутливого елемента на основі NaCl становить від  $0,030 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової

структури на основі NaCl – від  $0,125 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. Для вологочутливого елемента на основі BaCl<sub>2</sub> - діапазон зміни ємності становить від  $0,060 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової структури на основі BaCl<sub>2</sub> – від  $0,130 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф Розбіжність теоретичних та експериментальних досліджень складає 5%.

### Література

1. Бутурлин А.И., Крутоверцев С.А., Чистяков Ю.Д. Микроэлектронные датчики влажности // Научно-технический сборник. Зарубежная электронная техника. – 1984. - № 9. – С. 3-48
2. Вуйцік В., Готра З.Ю., Григор'єв В.В., Каліта В., Мельник О.М., Потенці Є. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Науково-навчальне видання. В 3 т. Том 1 / За редакцією Готри З.Ю. – Львів: Ліга Пресс, 2002. – 475 с.
3. Бугров А.В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. – М.: Машиностроение, 1982. – 94 с.
4. Аш Ж. Датчики измерительных систем. В 2-х книгах. – М.: Мир, 1992. – 424с.
5. Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по Химии. – К.: Наукова думка, 1974. – 992 с.
6. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 323 с.

**Осадчук Володимир Степанович** – Академік АІНУ, д.т.н., проф., зав. кафедрою електроніки, Вінницький національний технічний університет.

**Осадчук Олександр Володимирович** – д.т.н., проф., зав. кафедрою РТ, Вінницький національний технічний університет.

**Крилик Людмила Вікторівна** - к.т.н., ст. викладач кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет.

**Євсєєва Марія Василівна** - к.х.н., доц. кафедри хімії та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет.