

## ВОЛОГОЧУТЛИВИЙ ЄМНІСНИЙ СЕНСОР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ

© Осадчук О.В., Звягін О.С., Крилик Л.В., 2010

**Розроблено математичну модель ємнісного сенсора вологості, яка описує залежність електричної ємності від зміни кількості вологості нафтопродукту. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів – 3 %.**

**The mathematical model of the capacitive humidity sensor which describes the dependence of the capacity on the amount of the petroleum products humidity is developed. Discrepancy between the theoretical and experimental results is 3 %.**

**Вступ.** Важливою різновидністю вимірювальних перетворювачів є сенсори вологості, оскільки багато процесів залежать від вологості. Нині в Україні вимірювання вологості є одним із поширених напрямів вимірювань. Це зумовлено потужним промисловим та науково-технічним потенціалом країни з переважним розвитком таких галузей, як металургія, енергетика, машинобудування, авіаційна та космічна техніка, хімічна та нафтогазова промисловість, ефективність яких значною мірою залежить від точності вимірювань вологості. Тому створення цього класу перетворювачів є актуальним технічним завданням. Широке використання перетворювачів вологості ємнісного типу пояснюється їх простотою у використанні та низькою собівартістю [1–3]. Істотне значення має вимірювання вологості нафти, масел та нафтопродуктів. Контроль вологості нафти необхідний у процесах її видобування, зберігання, транспортування та переробки [4]. Саме наявність вмісту вологи в нафтопродуктах викликає зміну їх фізико-хімічних параметрів і тим самим зменшує строк їхньої служби.

Сьогодні існує велика кількість різноманітних сенсорів для вимірювання вологості нафтопродуктів, деякі з них вражають високою собівартістю та одночасно низькою надійністю, інші ж – застарілістю технологій вимірювання. У цій роботі наводиться один з можливих способів розв'язання цієї проблеми, що і становить її мету.

Вологочутливий ємнісний сенсор (рис. 1) складається з сіткоподібних електродів, які розміщені один навпроти одного так, що розташування отворів у першому електроді збігається з отворами в другому електроді [5]. Електроди 1 та 2 міцно закріплені до діелектричної труби 3, причому вони вкриті шаром полімеру 4 і містять отвори 5 для руху потоку рідини, що має діелектричні властивості. Зовнішній діаметр діелектричної труби дорівнює 50 мм, а відстань між електродами – 1,5 мм.

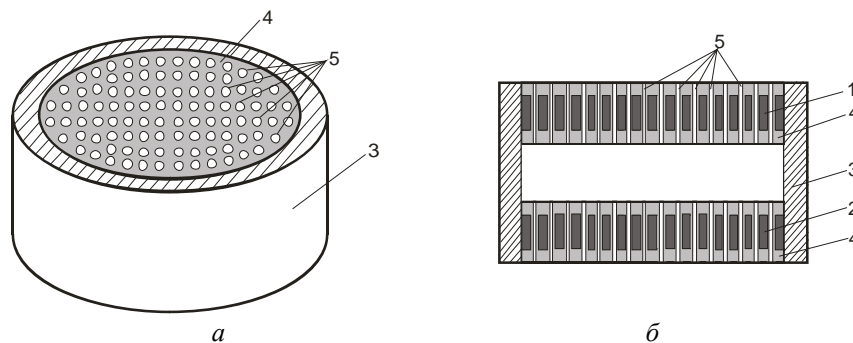


Рис. 1. Вологочутливий ємнісний сенсор для вимірювання вологості нафтопродуктів [5] загальний вигляд (а), поперечний переріз (б): 1, 2 – електроди; 3 – діелектрична труба; 4 – шар полімеру; 5 – отвори

Ємнісний сенсор працює так. Під час руху потоку рідини через діелектричну трубу, в якій міститься вологочутливий ємнісний сенсор для вимірювання вологості, рідина через отвори 5 заповнює простір між електродами 1 і 2, які вкриті шаром полімеру 4 і жорстко закріплені в діелектричній трубі 3. Це викликає зміну діелектричної проникності ємнісного сенсора вологості. Залежно від зміни вологості вимірювальної рідини змінюється її діелектрична проникність, отже, змінюється і ємність сенсора вологості.

**Теоретичні та експериментальні дослідження.** Якщо матеріал складається із суміші компонентів з різною діелектричною проникністю, то загальну поляризацію матеріалу можна знайти як суму поляризацій компонентів [6]. У нашому випадку для знаходження загальної діелектричної проникності  $\epsilon_{заг}$  потрібно врахувати діелектричну проникність гетерогенної суміші води та нафтопродукту  $\epsilon_c$ , у якій частинки розміщені хаотично, та діелектричну проникність полімеру  $\epsilon_n$ .

Для цього визначимо спочатку діелектричну проникність гетерогенної суміші води та нафтопродукту  $\epsilon_c$ . Молекули води є дисперсною фазою, а дисперсним середовищем відповідно є нафтопродукт. Для оцінювання  $\epsilon_c$  запропоновано емпіричне рівняння Бруггемана [4]

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_c}{\epsilon_1 - \epsilon_2} = (1 - a) \cdot \sqrt[3]{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_2}}, \quad (1)$$

де  $\epsilon_1$  – діелектрична проникність води;  $\epsilon_2$  – діелектрична проникність нафтопродукту;  $a$  – об’ємна концентрація води.

Вода належить до речовин, які здатні поляризуватись, тому для визначення значення діелектричної проникності води скористаємось комплексною діелектричною проникністю води [7]

$$\epsilon_1^* = \epsilon_1' - j(\epsilon_1' \cdot tg d_1), \quad (2)$$

де  $\epsilon_1^*$  – комплексна діелектрична проникність води;  $\epsilon_1'$  – дійсна складова комплексної діелектричної проникності води;  $tg d_1$  – тангенс кута діелектричних втрат води.

Дійсна складова комплексної діелектричної проникності води  $\epsilon_1'$  та тангенс кута діелектричних втрат  $tg d_1$ , своєю чергою, розраховуються з рівнянь [7]

$$\epsilon_1' = \epsilon_{O1} + \frac{\epsilon_{C1} - \epsilon_{O1}}{1 + (wt_1)^2}, \quad (3)$$

$$tg d_1 = \frac{(\epsilon_{C1} - \epsilon_{O1}) \cdot wt_1}{\epsilon_{C1} + \epsilon_{O1} \cdot (wt_1)^2}, \quad (4)$$

де  $\epsilon_{O1}$  – оптична діелектрична проникність води;  $\epsilon_{C1}$  – статична діелектрична проникність води;  $w$  – частота електричного поля, Гц;  $t_1$  – час релаксації молекул води, с.

Релаксаційні втрати води визначаються з рівняння [7]

$$t_1 = \frac{4ph_1a_1^3}{kT}, \quad (5)$$

де  $h_1$  – коефіцієнт динамічної в’язкості води, Па·с;  $a_1$  – радіус молекули води, м;  $k$  – стала Больцмана, Дж/К;  $T$  – температура, К.

Коефіцієнт динамічної в’язкості води визначається як добуток коефіцієнта кінематичної в’язкості на густину води [8]

$$h_1 = n_1 \cdot r_{H_2O}, \quad (6)$$

де  $n_1$  – коефіцієнт кінематичної в’язкості води, м<sup>2</sup>/с;  $r_{H_2O}$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт кінематичної в’язкості води та густина води, своєю чергою, визначаються з емпіричних рівнянь [9]

$$n_1 = \frac{n_{01}}{1 + 0,0337 \cdot (T - T_0) + 0,000221 \cdot (T - T_0)^2}, \quad (7)$$

$$r_{H_2O} = \frac{995,7}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3}(T - T_0)}, \quad (8)$$

де  $n_{01}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості води при температурі  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с;  $T_0$  – температура, яка дорівнює 273 К.

Знайдемо модуль комплексної діелектричної проникності води

$$e_1 = \sqrt{(e_1')^2 + (e_1' \cdot tg d_1)^2}. \quad (9)$$

Для визначення значення діелектричної проникності нафтопродукту скористаємось комплексною діелектричною проникністю нафтопродукту [7]

$$e_2^* = e_2' - j(e_2' \cdot tg d_2), \quad (10)$$

де  $e_2^*$  – комплексна діелектрична проникність нафтопродукту;  $e_2'$  – дійсна складова комплексної діелектричної проникності нафтопродукту;  $tg d_2$  – тангенс кута діелектричних втрат нафтопродукту.

Дійсна складова комплексної діелектричної проникності нафтопродукту  $e_2'$  та тангенс кута діелектричних втрат  $tg d_2$ , своєю чергою, розраховуються з рівнянь [7]

$$e_2' = e_{O2} + \frac{e_{C2} - e_{O2}}{1 + (wt_2)^2}, \quad (11)$$

$$tg d_2 = \frac{(e_{C2} - e_{O2}) \cdot wt_2}{e_{C2} + e_{O2} \cdot (wt_2)^2}, \quad (12)$$

де  $e_{O2}$  – оптична діелектрична проникність нафтопродукту;  $e_{C2}$  – статична діелектрична проникність нафтопродукту;  $t_2$  – час релаксації нафтопродукту, с.

Релаксаційні втрати нафтопродукту визначаються з рівняння [7]

$$t_2 = \frac{4ph_2a_2^3}{kT}, \quad (13)$$

де  $h_2$  – коефіцієнт динамічної в'язкості нафтопродукту, Па·с;  $a_2$  – радіус молекули нафтопродукту, м.

Коефіцієнт динамічної в'язкості нафтопродукту визначається як добуток коефіцієнта кінематичної в'язкості на густину нафтопродукту [8]

$$h_2 = n_2 \cdot r, \quad (14)$$

де  $n_2$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості нафтопродукту, м<sup>2</sup>/с;  $r$  – густина нафтопродукту, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості нафтопродукту та густина нафтопродукту, своєю чергою, визначаються з емпіричних рівнянь

$$n_2 = \frac{n_{02}}{\left(1 + 0,0337 \cdot (T - T_0) + 0,000221 \cdot (T - T_0)^2\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^2}, \quad (15)$$

$$r = \frac{874,2}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3}(T - T_0)}, \quad (16)$$

де  $n_{02}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості нафтопродукту при температурі  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с.

Знайдемо модуль комплексної діелектричної проникності нафтопродукту

$$e_2 = \sqrt{(e_2')^2 + (e_2' \cdot tg d_2)^2}. \quad (17)$$

Для визначення об'ємної концентрації води  $a$  скористаємось виразом:

$$a = \frac{V_{H_2O}}{V_{\text{суміші}}}, \quad (18)$$

$$V_{\text{суміші}} = V_{H_2O} + V, \quad (19)$$

де  $V_{H_2O}$ ,  $V$ ,  $V_{\text{суміші}}$  – об'єми води, нафтопродукту та суміші відповідно, м<sup>3</sup>.

Визначимо об'єм води  $V_{H_2O}$

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{r_{H_2O}}, \quad (20)$$

де  $m_{H_2O}$  – маса води, кг.

Підставивши вирази (19) і (20) у (18), отримаємо

$$a = \frac{m_{H_2O}}{r_{H_2O} \cdot \left( \frac{m_{H_2O}}{r_{H_2O}} + V \right)}. \quad (21)$$

Запишемо вираз для масової вологості  $W$  [4]

$$W = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{суміші}}} \cdot 100\% = \frac{m_{H_2O}}{m + m_{H_2O}} \cdot 100\%, \quad (22)$$

$$m_{H_2O} = \frac{W \cdot m}{100 - W}, \quad (23)$$

де  $m$ ,  $m_{\text{суміші}}$  – маси нафтопродукту та суміші відповідно, кг.

Підставивши значення  $m_{H_2O}$  з виразу (23) в (21), отримаємо

$$a = \frac{W \cdot r}{(100 - W) \cdot r_{H_2O} + W \cdot r}. \quad (24)$$

З урахуванням усіх вищенаведених розрахунків підставимо вираз (9), (17) та вираз (24) у рівняння (1). Виразивши з рівняння (1)  $e_c$ , отримаємо рівняння для визначення діелектричної проникності гетерогенної суміші води та нафтопродукту.

Загальна діелектрична проникності сенсора  $e_{\text{заг}}$  визначається з емпіричного рівняння Ліхтенекера [7] як діелектрична проникність двошарової структури, у якій першим шаром є полімер, а другим – гетерогенна суміш води та нафтопродукту

$$e_{\text{заг}} = \frac{e_n e_c}{b_1 e_c + b_2 e_n}, \quad (25)$$

де  $b_1$  – об'ємна концентрація шару полімеру між електродами;  $b_2$  – об'ємна концентрація гетерогенної суміші води та нафтопродукту.

Знайдемо об'ємні концентрації  $b_1$  та  $b_2$

$$b_1 = \frac{2Sh}{2Sh + pR^2(d - 2h)}, \quad (26)$$

$$b_2 = 1 - b_1, \quad (27)$$

де  $S$  – активна площа електрода, м<sup>2</sup>;  $h$  – товщина шару полімеру, м;  $R$  – радіус електрода, м;  $d$  – відстань між електродами, м.

Для розрахунку ємності вологочутливого сенсора з сіткоподібними електродами скористаємось формулою

$$C = \frac{e_{\text{заг}} \cdot e_0 \cdot S}{d}, \quad (28)$$

з урахуванням активної площі електродів  $S$ , а також усіх вищенаведених виразів рівність (28) матиме вигляд

$$C = \frac{\epsilon_n \epsilon_c \epsilon_0 (pR^2 - ppR_0^2)}{d(b_1\epsilon_c + b_2\epsilon_n)}, \quad (29)$$

де  $\epsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму, Ф/м;  $R_0$  – радіус отвору, м;  $p$  – кількість отворів у електроді.

Згідно з виразом (29) була розрахована ємність вологочутливого сенсора з сіткоподібними електродами в середовищі “Marle 13”. На рис. 2 подано теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливого сенсора від вологості нафтопродукту, а саме мінерального масла М8В в діапазоні від 0 % до 30 % масової вологості.

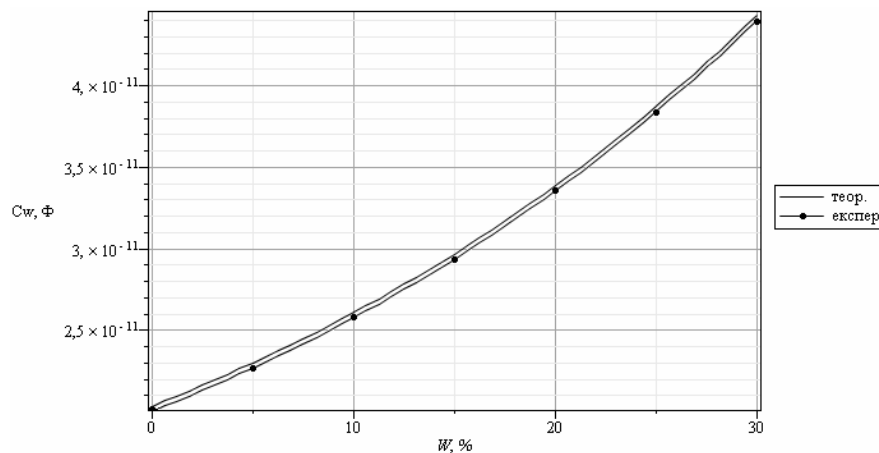


Рис. 2. Експериментальна та теоретична залежності зміни ємності від вологості мінерального масла М8В

Як видно із графіка, теоретичні та експериментальні залежності мають добрий збіг. Так, при зміні масової вологості від 0 % до 30 % ємність збільшується від 20 до 44 пФ. Адекватність математичної моделі можна оцінити за допомогою відносної похибки, яка становить 3 %.

**Висновки.** Розроблено математичну модель ємнісного сенсора вологості, яка описує залежність електричної ємності від величини вологості нафтопродукту. Вологомір являє собою конденсатор з сіткоподібними електродами, які закріплені у діелектричній трубці. Чутливість сенсора для мінерального масла становить близько 0,8 пФ/%, а розбіжність теоретичних та експериментальних результатів – 3 %.

1. *Мікроелектронні сенсори фізичних величин* / В. Вуйцик, З.Ю. Готра, В.В. Григор'єв і др. – Львів: Ліга-Прес, 2002. – 475 с. 2. *Фрайден Дж.. Современные датчики. Справочник.* – Москва: Техносфера, 2005. – 592 с. 3. *Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин* / О.А. Агеев, В.М. Мамиконова, В.В. Петров и др. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с. 4. Берлинер М.А. *Измерения влажности.* – М.: Энергия, 1973. – 400 с. 5. Пат. 40284 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. *Сенсор для вимірювання вологості* / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, О.С. Звягін (УКРАЇНА). – № 200814052; Заявл. 05.12.2008; Опубл. 25.03.2009; Бюл. № 6. – 2 с. 6. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В., Євсєєва М.В. *Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* – 2006. – № 2(12). – С. 229–234. 7. *Теория диэлектриков* / Н.П. Богородицкий, Ю.М. Волокобинский, А.А. Воробьев, Б.М. Таргев. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 344 с. 8. *Зиновьев В.А. Краткий технический справочник. Часть первая.* – М.–Л.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1949. – 532 с. 9. *Всё о воде. Вязкость воды [Электронный ресурс]* / О.В. Мосин. – Режим доступа к статье: <http://www.o8ode.ru/article/answer/pnanetwater/vyazkost.htm>.