

Дмитрів В.Т.
Стоцько З.А.
Дмитрів І.В.

Національний університет «Львівська
політехніка»

E-mail: Dmytriv_V@ukr.net

СИСТЕМА ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИКИ ЯКОСТІ ПАЛИВО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 631.432.2:53.084.2

Дмитрів В.Т., Стоцько З.А., Дмитрів І.В.. «Система експрес-діагностики якості паливо-мастильних матеріалів»

Вологість паливо-мастильних матеріалів є одним з визначальних показників їх якості. Присутність вологи в матеріалі впливає на їх фізико-хімічні і електричні властивості. Вода характеризується високою діелектричною проникністю і здатністю легко взаємодіяти з іншими речовинами.

Розроблення системи контролю вологості паливо-мастильних матеріалів у процесі експлуатації машини є невід'ємною частиною інформаційно-вимірювальних і керувальних систем сучасної мобільної техніки, і зокрема техніки спеціального призначення.

Ємнісні сенсори вологості є розподіленими структурами і у вимірювальних системах параметри вимірювання є як ємність, так і опір й індуктивність. Для реалізації ємнісного вимірювача з лінійною калібрувальною характеристикою, враховано що вимірювальне середовище є з великими змінними активними втратами, якими є оливи і палива двигунів внутрішнього згорання. Для компенсування активних втрат застосовано схему з окремим вимірюванням реактивної складової повного опору діелькометричного первинного перетворювача на основі модуляції параметрів вимірювального резонансного контуру. Параметри такої схеми обирали так, щоб при вимкненій модуляційній ємності повна провідність схеми мала індуктивний характер.

За міру якості перетворення вимірювальної схеми сенсора прийнято диференціальну чутливість, яка характеризує відношення відносних приростів вихідного (повної провідності) й вхідного (реактивної провідності) параметрів.

Розроблений автоматичний одночастотний вимірювач з ємнісним сенсором, виконаним у вигляді електродів розсіяного поля, покритих шаром ізоляції, в якому використано метод модуляції параметрів вимірювального резонансного контуру. Для перевірки теоретичних досліджень проведений повний факторний експеримент на трьох рівнях при двох факторах – вологості досліджуваного середовища і частота напруги живлення вимірювального контуру.

Працездатність вимірювальної схеми ємнісного перетворювача зберігається у всьому діапазоні вимірювань, якщо добротність ємнісного вимірювального перетворювача в матеріалі більша одиниці.

Ключові слова: паливо, сенсор, ємність, резонанс, диференціальна чутливість, планований експеримент.

Дмитрів В.Т., Стоцько З.А., Дмитрів І.В.. «Система експрес-діагностики якості паливо-мастильних матеріалів»

Влажность топливо-смазочных материалов есть определяющим показателем его качества. Наличие влажности в материалах влияет на их физико-химические и электрические свойства. Вода характеризуется высокой диэлектрической проницаемостью и способностью легко взаимодействовать с веществами.

Разработка система контроля влажности топливо-смазочных материалов в процессе эксплуатации машины есть частью информационно-измерительных и управляющих систем современной мобильной техники, и в частности техники специального назначения.

Емкостные датчики влажности есть распределенными структурами и в измерительных системах параметрами измерения есть как емкость, а также сопротивление и индуктивность. Для реализации емкостного измерителя с линейной калибровочной характеристикой, учтено что измерительная среда имеет большие переменные активные потери, такой средой есть масло и топливо для двигателей внутреннего сгорания. Для компенсации активных потерь применена схема с отдельным измерением реактивной составляющей полного сопротивления диелькометрического датчика путем модуляции параметров измерительного резонансного контура. Параметры такой схемы подобраны таким образом, чтоб при отрицательной модуляционной емкости полная проводимость схемы имела индуктивный характер.

Параметром качестве преобразования измерительной схемы датчика принято дифференциальную чувствительность, как отношение относительных приростов выходного (полная проводимость) и входного (реактивная проводимость) параметров.

Разработан автоматический одночастотный измеритель с емкостным датчиком, выполненный в виде электродов рассеянного поля, с шаром изоляции, с использованием метода модуляции параметров измерительного резонансного контура. Для проверки теоретических исследований проведен полный

факторний експеримент на трьох рівнях при двох факторах – вологість досліджуваної середовища і частота напруги живлення вимірювального контуру.

Роботоспособність вимірної схеми ємкостного перетворювача зберігається на всьому діапазоні вимірювань, якщо добротність ємкостного вимірної перетворювача в матеріалі більше одиниці.

Ключеві слова: паливо, датчик, ємкість, резонанс, диференціальна чутливість, планований експеримент.

Dmytriv V., Stotsko Z., Dmytriv I. «System express diagnostics of quality fuels and lubricants»

Humidity of fuels and lubricants is one of the determining indicators of their quality. The presence of moisture in the material affects their physicochemical and electrical properties. Water is characterized by high dielectric constant and the ability to easily interact with other substances.

The development of a humidity control system for fuels and lubricants during the operation of the machine is an integral part of the information-measuring and control systems of modern mobile equipment, and in particular special purpose vehicles.

Capacitive humidity sensors are distributed structures and in measuring systems the measurement parameters are both capacitance and resistance and inductance. To implement a capacitive meter with a linear graded characteristic, it is taken into account that the measuring medium is with large variable active losses, which are oils and fuels of internal combustion engines. To compensate for the active losses, a circuit with a separate measurement of the reactive component of the impedance of the dielectric primary transducer based on the modulation of the parameters of the measuring resonant contour is used. The parameters of such a circuit are chosen so that when the modulation capacitor is disconnected, the full conductivity of the circuit had an inductive nature.

The quality of the transformation of the measuring circuit of the sensor is adopted by the differential sensitivity, which characterizes the ratio of the relative increments of the output (full conductivity) and input (reactive conductivity) parameters.

An automatic single-frequency meter with a capacitive sensor made in the form of electrodes scattered field electrodes covered with an insulation layer has been developed, in which the method of modulation of the parameters of the measuring resonant circuit is used. To verify the theoretical studies, a complete factorial experiment was performed at three levels with two factors - the humidity of the test medium and the frequency of the supply voltage of the measuring contour.

The efficiency of the measuring circuit of the capacitive transducer is maintained in the entire range of measurements, if the quality factor of the capacitive measuring transducer in the material is greater than one.

Keywords: fuel, sensor, capacity, resonance, differential sensitivity, planned experiment.

Вступ

Сучасний розвиток енергетичних засобів для транспорту, і зокрема для військово-промислового комплексу, вимагає точного і своєчасного виконання технічних і технологічних регламентних втручань з метою підвищення роботоздатності і надійності двигунів внутрішнього згорання. Важливою складовою є паливо-мастильні матеріали, це палива і оливи для мащення систем двигунів, а присутність у них включень від спрацювання деталей тертя, вологості у вигляді води чи інших рідких компонентів, призводить до виникнення несправності у самий незручний момент функціонування машини і обладнання.

На сьогодні стан економіки визначається розробленням та застосуванням автоматизованих систем технічної діагностики як машин так і обладнання, приладів неруйнівного контролю, систем перевірки якості матеріалів і продукції, контролю параметрів промислових середовищ тощо. Ефективність автоматизованих систем, насамперед, залежить від якості первинних перетворювачів, які є основними чутливими елементами вимірювальної техніки. Аналіз вимірювальних первинних перетворювачів показав, що для матеріалів з великими активними втратами вимірювання реактивної складової повної провідності доцільно проводити ємнісними сенсорами на високій частоті. [1–7]

Актуальність проблеми

Вологість паливо-мастильних матеріалів є одним з визначальних показників якості, оскільки фізичні і технологічні властивості матеріалів, роботоздатність машини залежить від вологості палива і оливи мащення. Присутність вологи в матеріалі сильно впливає на їх фізико-хімічні і електричні властивості. Це пов'язано із високою діелектричною проникністю води, її здатністю легко взаємодіяти з іншими речовинами.

Тому розроблення системи контролю вологості паливо-мастильних матеріалів в процесі експлуатації машини є невід'ємною частиною інформаційно-вимірювальних і керувальних систем сучасної мобільної техніки, і зокрема техніки спеціального призначення, що і обумовлює актуальність поставленої проблеми.

Система діагностики вологості паливо-мастильних матеріалів безпосередньо на працюючій машині повинна задовольняти низку вимог, головними з яких є:

- 1) безперебійний контроль заданих параметрів із необхідною точністю;
- 2) сумісність із сучасними мікропроцесорними системами в апаратному виконанні та програмному забезпеченні;
- 3) відсутність впливу на технологічний процес і технічні характеристики обладнання;
- 4) простота обслуговування, економічність, екологічність і висока надійність.

Аналіз останніх досліджень

Ємнісні сенсори вологості є розподіленими структурами і у вимірювальних системах параметрами вимірювання є як ємність, так і опір й індуктивність. Ряд дослідників вважає, що опір і індуктивність ємнісного сенсора є паразитними величинами, а сама ємність мікроелектронних сенсорів є в межах 10...100 пФ, а її зміна в залежності від вмісту вологості є порядку 0,1 пФ зміни відносної вологості. [8, 9] Для підвищення інформативності вимірювального параметру необхідно змінювати частоту контуру вимірювального сенсора (за змінного живлення вимірювального контуру) в широкому діапазоні.

Відомості про частотну залежність діелектричної проникливості $\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$ (КДП) вологих середовищ необхідно для високочастотного контуру живлення вимірювальної схеми. Але в більшості робіт з дослідження діелектричних характеристик вологих середовищ діелектричні властивості зв'язаної води окремо не досліджуються. [10, 11]

Досліджували зв'язану воду, використовуючи модель Дебая, в якій параметри моделі відрізнялися від параметрів вільної води тривалістю релаксації, яка залежить від кількості води. [12, 13] Були проведені дослідження в частотному діапазоні від 1 МГц до 4 ГГц з використанням векторних аналізаторів ZVRE. [14]

Низьку частоту вимірювального контуру застосовують для мінімізації екрануючого ефекту для вимірювальної системи. Для вимірювання вмісту води в нафті оцінкою діелектричної проникності застосовували ємнісний сенсор, ввімкнений у вимірювальний контур з частотою 2 МГц. [15] Ряд дослідників вимірювали ємність середовища за частоти вимірювального контуру 1 МГц. [16, 17]

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розроблення теоретичних і експериментальних досліджень експрес-діагностики якості паливо-мастильних матеріалів двигунів внутрішнього згорання. За критерій показника якості вибрано вміст вологи в паливі.

Результати досліджень

Для реалізації ємнісного вимірювача з лінійною калібрувальною характеристикою, враховуємо що вимірювальне середовище є з великими змінними активними втратами, якими є оливи і палива двигунів внутрішнього згорання.

Компенсувати активні втрати можна, застосовуючи схеми з окремим вимірюванням реактивної складової повного опору діелькометричного первинного перетворювача на основі модуляції параметрів вимірювального резонансного контуру. Параметри такої схеми (рис. 1) обираються так, щоб при вимкненій модуляційній ємності $C_{МК}$ повна провідність схеми мала індуктивний характер, тобто [7]:

$$\frac{1}{\omega \cdot L} > \omega(C_X + C_K). \quad (1)$$

При під'єднанні ємності $C_{МК}$ повна провідність має ємнісний характер:

$$\frac{1}{\omega \cdot L} > \omega(C_X + C_K + C_{МК}). \quad (2)$$

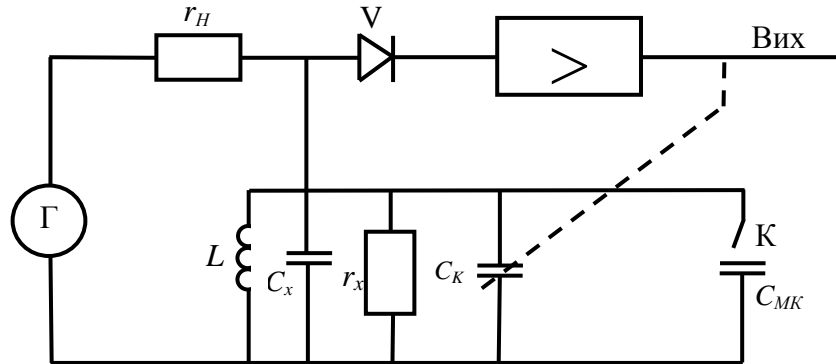


Рис. 1. Схема вимірювання ємності конденсаторів з великими втратами

Величина ємності $C_{МК}$ обирається так, щоб виконувалась рівність:

$$\left| \omega(C_X + C_K) - \frac{1}{\omega \cdot L} \right| = \left| \omega(C_X + C_K + C_{МК}) - \frac{1}{\omega \cdot L} \right|. \quad (3)$$

В такому випадку напруга основної частоти вимірювального контуру буде моделюватися ввімкненням конденсатора модуляції $C_{МК}$.

Стан схеми, що відповідає останній умові, відповідає стану рівноваги, за якого параметри контуру зв'язані відношенням:

$$|y| = |y'|,$$

або

$$\left| \frac{1}{r_x} + j \left[\omega(C_X + C_K) - \frac{1}{\omega \cdot L} \right] \right| = \left| \frac{1}{r_x} + j \left[\omega(C_X + C_K + C_{МК}) - \frac{1}{\omega \cdot L} \right] \right|. \quad (4)$$

З залежності (4) визначаємо значення вимірюваної ємності C_X [7]:

$$C_X = \frac{\omega \left(C_K + \frac{1}{2} C_{МК} \right) - \frac{1}{\omega \cdot L}}{\omega}, \quad (5)$$

де ω – частота напруги живлення вимірювального контуру;

C_K – компенсаційна ємність;

$C_{МК}$ – ємність конденсатора модуляції;

L – індуктивність вимірювального контуру.

Для прикладу, сенсором є конденсатори розсіяного поля – дві металеві пластини шириною 10 мм, розміщені в одній площині на віддалі 10 мм. Робоча довжина електродів сенсора становить 200 мм. Ємність такого конденсатора визначається залежністю [19]:

$$C = \frac{2 \cdot \epsilon_a}{\pi} \cdot \ln \left[4 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a}{d} \right) \right], \quad (6)$$

де a – ширина електродів, м;

d – віддаль між електродами, м;

ϵ_a – абсолютна діелектрична проникливість.

Враховуючи, що $\varepsilon_a = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, то геометрична погонна ємність (в повітрі) сенсора буде становити:

$$C = 14 \text{ пФ/м.}$$

Для вибраної робочої довжини електродів сенсора ($l = 0,2$ м) геометрична ємність сенсора буде становити:

$$C_{CT} = 2,8 \text{ пФ.}$$

Враховуючи, що відносна вологість нафтопродуктів не може перевищувати 30%, відносна діелектрична проникність бу де в межах 1,8...35. [20, 21] Тоді геометрична ємність сенсора у процесі вимірювання вологості може змінюватись в межах $C_{CT} = 5 \dots 98$ пФ. Ці дані є базовими для вибору параметрів елементів вимірювальної схеми сенсора вмісту води в паливо-мастильних матеріалах.

За міру якості перетворення вимірювальної схеми сенсора прийнято диференціальну чутливість, яка характеризує відношення відносних приростів вихідного й вхідного параметрів і описується залежністю:

$$S = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y}, \quad (7)$$

де x – вхідний параметр;

y – вихідний параметр.

Вихідним параметром вимірювальної схеми сенсора є повна провідність паралельної схеми заміщення, з врахуванням величини ємності ізоляції буде:

$$y = \frac{\omega^2 \cdot r_x \cdot C_M}{1 + \omega^2 \cdot r_x^2 \cdot (C_M + C_x)^2} + j \cdot \frac{\omega \cdot C_M + \omega^3 \cdot r_x^2 \cdot C_M \cdot C_x \cdot (C_M + C_x)}{1 + \omega^2 \cdot r_x^2 \cdot (C_M + C_x)^2}, \quad (8)$$

а еквівалентна вимірювальна ємність на виході вимірювальної схеми сенсора буде:

$$C_E = \frac{C_M + \omega^2 \cdot r_x^2 \cdot C_M \cdot C_x \cdot (C_M + C_x)}{1 + \omega^2 \cdot r_x^2 \cdot (C_M + C_x)^2}. \quad (9)$$

Прийнявши відношення $H = C_M/C_x$ і $Q_{\Pi} = \omega \cdot r_x \cdot C_x$ за залежністю (7), у якій вихідним параметром є повна провідність y (8), а вхідним параметром є реактивна провідність $B_x = \omega \cdot C_x$, отримаємо залежність диференціальної чутливості вимірювального схеми сенсора вологості:

$$S = \frac{Q_{\Pi}^4 \cdot H^2 \cdot (H + 1) - Q_{\Pi}^2 \cdot Y}{[1 + Q_{\Pi}^2 \cdot (H + 1)^2] \cdot [H + Q_{\Pi}^2 \cdot (H + 1)]}. \quad (10)$$

Результати моделювання диференціальної чутливості наведені на рис. 2 і 3.

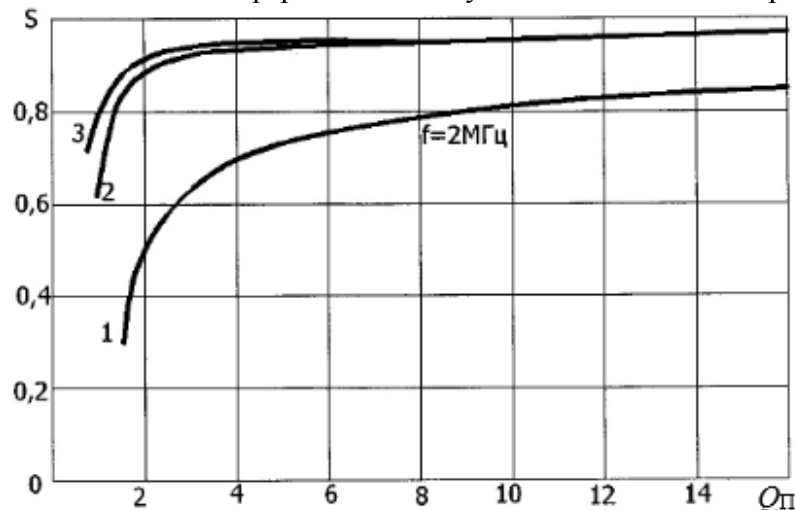


Рис. 2. Залежність диференціальної чутливості ємнісного сенсора від його добротності в матеріалі 1 – для сенсора з односторонніми електродами ($C_M = 32$ пФ); 2,3 – для сенсора з електродами розсіяного поля при частотах 2 і 5 МГц ($C_M = 144$ пФ і $C_M = 112$ пФ)

На основі розглянутого методу з модуляцією параметрів вимірювального резонансного контуру розроблений автоматичний одночастотний вимірювач з ємнісним сенсором, виконаним у вигляді електродів розсіяного поля, покритих шаром ізоляції.

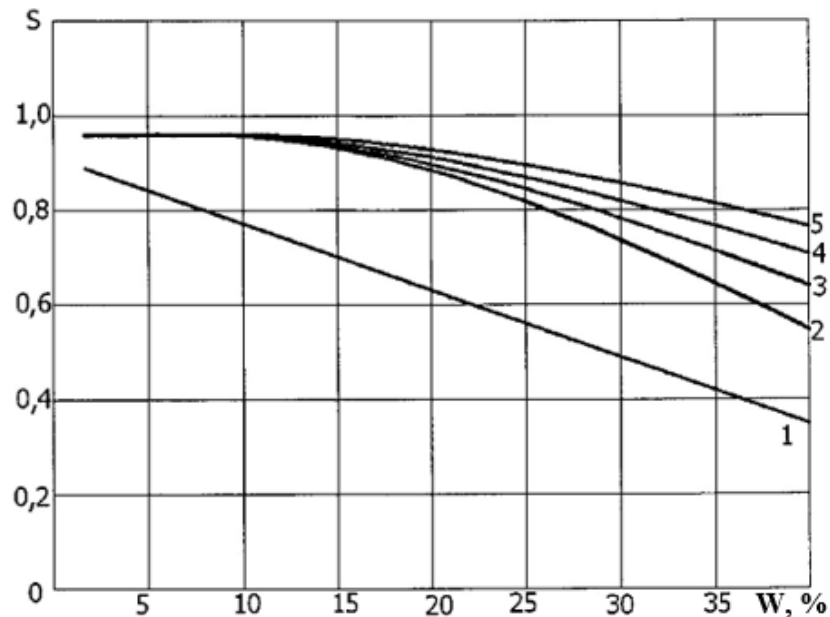


Рис. 3. Залежність диференціальної чутливості ємнісного сенсора від вологості вимірювального середовища за товщини ізоляції електродів розсіяного поля: $C1_M < C2_M < C3_M < C4_M < C5_M$

Функціональна схема вимірювача наведена на рис. 4.

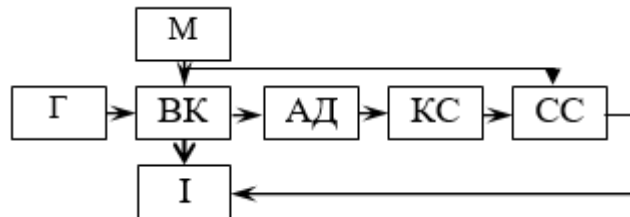


Рис. 4. Функціональна схема вимірювального перетворювача

Г – генератор імпульсів високої частоти; М – модулятор; ВК – вимірювальний контур; А – амплітудний детектор; КС – ключ; СС – схема співпадання; І – інтегратор

Особливістю роботи такої схеми, є те, що вона завжди знаходиться в режимі динамічної рівноваги, а вихідна напруга інтегратора є мірою реальної ємності сенсора і, відповідно, вимірюваної провідності середовища.

Для перевірки теоретичних досліджень нами проведений повний факторний експеримент на трьох рівнях при двох факторах в околі вибраної точки $x_{01} = 16 \%$; $x_{02} = 5$ МГц.

Рівні факторів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Рівні варіювання факторів та їх кодовані значення

Фактор	Позначення	Розмірність	Рівні факторів			Інтервал варіювання ϵ
			верхній	нульовий	нижній	
			Кодовані значення			
Вологість	x_1	%	+1	0	-1	14
Частота напруги живлення вимірювального контуру	x_2	МГц	30	26	2	4,5

Результати опрацювання експериментальних даних подані кореляційною залежністю (11) і наведені на рис. 5.

$$y = 2,5612 + 1,0783 \cdot x_1 - 0,0262 \cdot x_2 - 0,0001 \cdot x_1^2 - 0,54 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0003 \cdot x_2^2 \quad (11)$$

Розрахункове значення критерію Кохрена становить $G_p = 0,2288$, є менше від табличного значення критерію Кохрена, яке рівне $G_T = 0,2354$ [22]. Дослід відтворюється.

Середня дисперсія становить $S^2 = 1,0219$, а порядкова дисперсія - $S_{ni}^2 = 0,0126$.

Для порівняння кожного коефіцієнта регресії з виразом S_{At} , визначали t -критерій Стьюдента для вибраного рівня значимості 0,05 ступеня свободи $f_n = 27 \cdot (3-1) = 54$. Табличне значення критерію було $t = 2,004$ [22], а вираз $S_{At} = 0,02525$. Провівши порівняння кожного коефіцієнта, коефіцієнти $b_{11} = 0,0001$ і $b_{22} = 0,0003$ незначимі, що свідчить про лінійний характер залежності (11).

Розрахункове значення критерію Фішера становить $F_p = 0,3797$, а дисперсія адекватності - $S_{a\partial}^2 = 0,3881$ [22]. Табличне значення F -критерію за ступенів вільності головної дисперсії $f_1 = 27-4 = 23$ та дисперсії адекватності $f_2 = 27 \cdot (3-1) = 54$, становить $F_T = 1,7$ [22].

Адекватність моделі оцінюємо за умовою $F_p \leq F_T$. Умова виконана $0,3797 \leq 1,7$ – модель адекватна.

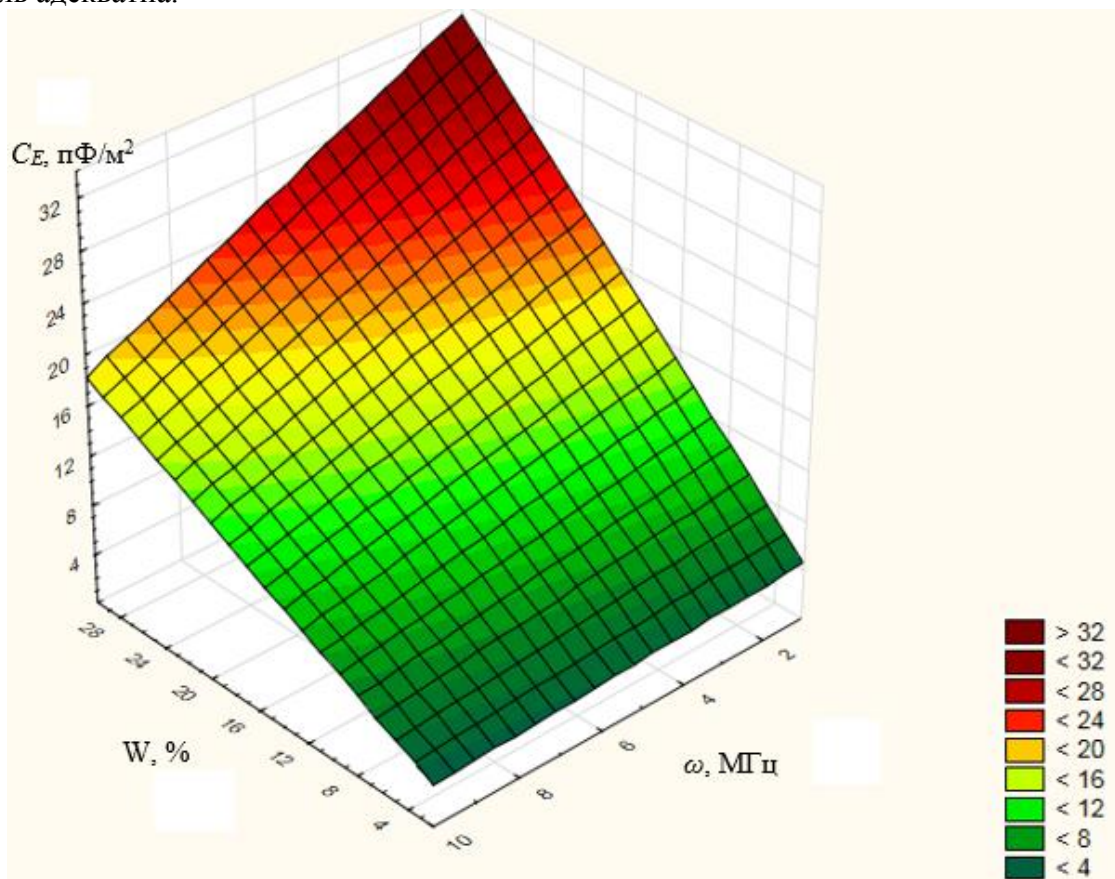


Рис. 5. Залежність вихідної питомої геометричної ємності C_E смісного первинного вимірювального перетворювача від вмісту вологості W в досліджуваному паливі і частоти ω напруги живлення вимірювального контуру

Як показує аналіз графіка (рис. 5) за змін вмісту вологості в межах $W = 2...30$ % і частоти напруги живлення вимірювального контуру $\omega = 1...10$ МГц значення питомої геометричної ємності є межах $C_E = 3,3454...33,1737$ пФ/м². З підвищенням вмісту

вологості і зростанням частоти напруги живлення вимірювального контуру вимірювальна ємність зростає лінійно.

Результати експериментальних досліджень показують, що компенсуючи активні втрати, застосовуючи схему вимірювання реактивної складової повного опору діелькометричного первинного перетворювача на основі модуляції параметрів вимірювального резонансного контуру, можна отримати лінійну характеристику зміни ємності в залежності від вологості вимірювального середовища.

Висновки

Результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволяють зробити висновок, що зміна частоти напруги живлення вимірювального контуру в межах 1...10 МГц практично не впливає на чутливість ємнісного перетворювача (рис. 2 і 3), яка має високі значення у наведеному інтервалі вмісту вологості в досліджуваному середовищі.

Характер зміни диференціальної чутливості за збільшення товщини ізоляції (зменшення ємності C_M) уможливує отримання лінійної залежності вихідної ємності вимірювального перетворювача від вмісту вологості в досліджуваному середовищі (рис. 3).

За добротності вимірювального контуру $Q_{\Pi} > 5$ диференціальна чутливість практично незмінна. Таке значення добротності відповідає низькому вмісту вологості (рис. 2). Діапазон вимірювання добротності ємнісного первинного перетворювача з ізольованими електродами є в межах 1...2, а диференціальна чутливість змінюється від 0,5 до 0,9.

Стабільність роботи ємнісного вимірювального перетворювача залежить від стабільності частоти напруги живлення вимірювального контуру і відсутності реактивної складової в зовнішньому електричному ланцюгу, відносно до вимірювального контуру.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що основними критеріями вибору ізоляції електродів сенсора є забезпечення лінійності його характеристики і добротності вимірювального контуру $Q_{\Pi} > 1$.

Список використаних джерел

1. Zhi, Chen. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms / Zhi Chen, Chi Lu // *Sensor Letters*. – 2005. – Vol. 3. – P. 274–295. – doi:10.1166/sl.2005.045.
2. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // *Sensors*. – 2014. – № 14. – P. 7881–7939. – doi:10.3390/s140507881.
3. Ashis, Tripathy. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca,Mg,Fe,Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption / Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman // *Sensors*. – 2016. – № 16. – P. 1135. – doi:10.3390/s16071135.
4. Mario Pelino. Principles and applications of ceramic humidity sensors / Mario Pelino, Carlo Cantalini // *Active and Passive Elec. Comp.* – 1994. – Vol. 16. – P. 69–87.
5. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor / Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder // *Journal of microelectromechanical system*. – february 2010. – Vol. 19. – № 1. – P. 183–191. – doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.
6. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. – 30 March 2006. – Vol. 114. – № 1. – P. 254–262.
7. Якимець В. Вимірювання реактивної складової повної провідності височастотного діелькометричного перетворювача для матеріалів з великими

активними втратами / Якимець В., Дмитрів В., Дробот І. // Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. – Львів. Львів. національний агроуніверситет, 2009. - № 13. - Т. 1. - С. 372-379.

8. Qiu Y. CMOS Humidity sensor with calibrated voltage output / Qiu Y., Azeredo Leme C., Franca J.E. // The 14 European Conference on Solid-State Transducers, August 27-28, Copenhagen, Denmark, 2000. - Pp. 75-78.

9. Ruther P. Humidity microsensors using silica aerogel thin films / Ruther P., Burg M., Steinert C., Paul O. // The 14 European Conference on Solid-State Transducers, August 27-28, Copenhagen, Denmark, 2000. - Pp. 79-82.

10. Ishida T. Dielectric-relaxation spectroscopy of kaolinite, montmorillonite, allophane, and imogolite under moist conditions / Ishida T., Makino T., Wang C. // Clays and Clay Minerals. 2000. Vol. 48. № 1. P. 75–84.

11. Kelleners T. J. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils / Kelleners T. J., Robinson D. A., Shouse P. J. // Soil Sci. Soc. Am. J. 2005. Vol. 69. № 1. P. 67–76.

12. Боярский Д.А. Учет диэлектрических свойств связанной воды при моделировании эффективной диэлектрической проницаемости влажных почв в СВЧ-диапазоне. / Боярский Д.А., Тихонов В.В. // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 4. С. 446–454.

13. Boyarskii D. A. Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing / Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu. // Progress in Electromagnetics Research, PIER. 2002. Vol. 35. P. 251–269.

14. Беляева Т. А., Изменение диэлектрических свойств связанной воды в почвах при увеличении ее количества / Беляева Т. А., Бобров П. П., Кондратьева О. В. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2013. Спец. вып. 5(51). - С. 92–95.

15. Demori M., Ferrari V., Strazza D. A sensor system for oil fraction estimation in a two phase oil-water flow. Procedia Chem. 2009, 1. – Pp. 1247-1250.

16. Abouelwafa M.S.A., Kendall E.J.M. The use of capacitance sensors for phase percentage determination in multiphase pipelines. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1980, 29.- Pp. 24-27.

17. Geraets J.J.M., Borst, J.C. A capacitance sensor for two-phase void fraction measurement and flow pattern identification. Int. J. Multiph. Flow. 1988, 14. – Pp. 305-320.

18. Jaworek A., Krupa A. Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow. Sens. Actuators A Phys. 2010, 160. – Pp. 78-86.

19. Каменев Л. В. Диэлькометрические влагомеры на основе схем с параметрической модуляцией / Л. В. Каменев, В. С. Ройфе // Приборы и системы управления. – 1974. – №10. – С.17-18.

20. Наглюк И.С. Диэлектрическая проницаемость моторных и трансмиссионных масел транспортных машин / Наглюк И.С., Григоров А.Б. // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". - Луцьк, 2010, Вип. 28. – С. 349-352.

21. Скворцов Б.В. Исследование корреляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов / Скворцов Б.В., Силов Е.А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2009. - Т. 11, №5. – С. 64-71.

22. Дмитрів І.В. Автомобільний транспорт. Теорія і практика наукових досліджень: навч. посіб. – Львів: СПОЛОМ, 2019. – 316 с.

References

1. Zhi, Chen. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms / Zhi Chen, Chi Lu // *Sensor Letters*. – 2005. – Vol. 3. – P. 274–295. – doi:10.1166/sl.2005.045.
2. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // *Sensors*. – 2014. – № 14. – P. 7881–7939. – doi:10.3390/s140507881.
3. Ashis, Tripathy. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca,Mg,Fe,Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption / Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman // *Sensors*. – 2016. – № 16. – P. 1135. – doi:10.3390/s16071135.
4. Mario Pelino. Principles and applications of ceramic humidity sensors / Mario Pelino, Carlo Cantalini // *Active and Passive Elec. Comp.* – 1994. – Vol. 16. – P. 69–87.
5. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor / Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder // *Journal of microelectromechanical system*. – february 2010. – Vol. 19. – № 1. – P. 183–191. – doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.
6. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. – 30 March 2006. – Vol. 114. – № 1. – P. 254–262.
7. Yakymets V. Vymiriuvannia reaktivnoi skladovoi povnoi providnosti vysokochastotnoho dielkometrychnoho peretvoriuvacha dlia materialiv z velykymy aktyvnymy vtratamy / Yakymets V., Dmytriv V., Drobot I. // *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu: Ahroinzhenerni doslidzhennia*. – Lviv. Lviv. natsionalnyi ahrouniversytet, 2009. – № 13. – T. 1. – S. 372–379.
8. Qiu Y. CMOS Humidity sensor with calibrated voltage output / Qiu Y., Azeredo Leme C., Franca J.E. // *The 14 European Conference on Solid-State Transducers*, August 27–28, Copenhagen, Denmark, 2000. – Pp. 75–78.
9. Ruther P. Humidity microsensors using silica aerogel thin films / Ruther P., Burg M., Steinert C., Paul O. // *The 14 European Conference on Solid-State Transducers*, August 27–28, Copenhagen, Denmark, 2000. – Pp. 79–82.
10. Ishida T. Dielectric-relaxation spectroscopy of kaoliite, montmorillonite, allophane, and imogolite under moist conditions / Ishida T., Makino T., Wang C. // *Clays and Clay Minerals*. 2000. Vol. 48. № 1. P. 75–84.
11. Kelleners T. J. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils / Kelleners T. J., Robinson D. A., Shouse P. J. // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2005. Vol. 69. № 1. P. 67–76.
12. Boyarskiy D.A. Uchet dielektricheskikh svoystv svyazannoy vodyi pri modelirovanii effektivnoy dielektricheskoy pronitsaemosti vlazhnyih pochv v SVCh-diapazone. / Boyarskiy D.A., Tihonov V.V. // *Radiotekhnika i elektronika*. 1998. T. 43. № 4. S. 446–454.
13. Boyarskii D. A. Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing / Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu. // *Progress in Electromagnetics Research, PIER*. 2002. Vol. 35. P. 251–269.
14. Belyaeva T. A., Izmenenie dielektricheskikh svoystv svyazannoy vodyi v pochvah pri uvelichenii ee kolichestva / Belyaeva T. A., Bobrov P. P., Kondrateva O. V. // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo un-ta im. akad. M. F. Reshetneva*. 2013. Spets. vyip. 5(51). – S. 92–95.
15. Demori M., Ferrari V., Strazza D. A sensor system for oil fraction estimation in a two phase oil-water flow. *Procedia Chem*. 2009, 1. – Pp. 1247–1250.
16. Abouelwafa M.S.A., Kendall E.J.M. The use of capacitance sensors for phase percentage determination in multiphase pipelines. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1980, 29. – Pp. 24–27.
17. Geraets J.J.M., Borst, J.C. A capacitance sensor for two-phase void fraction measurement and flow pattern identification. *Int. J. Multiph. Flow*. 1988, 14. – Pp. 305–320.

18. Jaworek A., Krupa A. Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow. *Sens. Actuators A Phys.* 2010, 160. – Pp. 78-86.
19. Kamenev L. V. Dielektricheskie vlagomeryi na osnove shem s parametricheskoy modulyatsiey / L. V. Kamenev, V. S. Royfe // *Pribory i sistemy upravleniya.* – 1974. – №10. – S.17-18.
20. Naglyuk I.S. Dielektricheskaya pronitsaemost motornyih i transmissionnyih masel transportnyih mashin / Naglyuk I.S., Grigorov A.B. // *Mizhvuzivskyi zbirnyk "Naukovi notatky".* - Lutsk, 2010, Vyp. 28. – S. 349-352.
21. Skvortsov B.V. Issledovanie korrelyatsionnyih zavisimostey mezhdou oktanovym chislom i elektrodinamicheskimi parametrami uglevodorodnyih produktov / Skvortsov B.V., Silov E.A. // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk,* 2009. - T. 11, №5. – S. 64-71.
22. Dmytriv I.V. *Avtomobilnyi transport. Teoriia i praktyka naukovykh doslidzhen: navch. posib.* – Lviv: SPOLOM, 2019. – 316 s.