

УДК 621.382

О.В. ОСАДЧУК, Л.В. КРИЛИК, Я.О. ОСАДЧУК

Вінницький національний технічний університет

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Розроблено математичну модель частотного параметричного перетворювача вологості з ємнісними елементами виготовленими на основі:  $\text{NaCl}$ +полімер,  $\text{NaCl}$ ;  $\text{BaCl}_2$ +полімер,  $\text{BaCl}_2$ , а також ємнісних елементів виготовленими на основі комплексних сполук. Параметричний перетворювач вологості з частотним виходом розроблено на основі біполярної транзисторної структури, що утворює активну індуктивність з динамічним від'ємним опором, яка з вологочутливим конденсатором  $C_W$  утворює коливальний контур перетворювача. Математичне моделювання та експериментальні дослідження показали, що в діапазоні відносної вологості від 30 % до 100 %, діапазон зміни ємності для вологочутливого елемента на основі  $\text{NaCl}$  становить від  $0,030 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової структури на основі  $\text{NaCl}$ +полімер – від  $0,125 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. Для вологочутливого елемента на основі  $\text{BaCl}_2$  – діапазон зміни ємності становить від  $0,060 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової структури на основі  $\text{BaCl}_2$ +полімер – від  $0,130 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. На основі експериментальних досліджень встановлено, що на чутливість сенсора впливає склад комплексних сполук, а саме найчутливішим в діапазоні вологості від 7 % до 27 % є ємнісний елемент виготовлений на основі гетерометалевої комплексної сполуки II, яка містить два атома стибію. Чутливість такого ємнісного елемента набуває значення 285 пФ/%. Залежність ємності від відносної вологості, в діапазоні від 30 % до 75 %, практично лінійна, а чутливість дорівнює 135 пФ/%. В діапазоні 75...95 % спостерігається різке зростання чутливості аж до 450 пФ/% для всіх ємнісних елементів виготовлених на основі гетерометалевих комплексних сполук I – IV. На основі математичного моделювання отримано графічні залежності функції перетворення та чутливості частотного параметричного перетворювача вологості. Найбільша чутливість частотного параметричного перетворювача вологості для зміни вологості навколишнього середовища становить 62...107 кГц/%.

Ключові слова: частотний перетворювач вологості; вологочутливий ємнісний елемент; від'ємний диференційний опір; функція перетворення; рівняння чутливості.

А.В. ОСАДЧУК, Л.В. КРИЛИК, Я.А. ОСАДЧУК

Винницкий национальный технический университет

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ С ЧАСТОТНЫМ ВИХОДОМ

Разработана математическая модель частотного параметрического преобразователя влажности с емкостными элементами изготовленными на основе:  $\text{NaCl}$  + полимер,  $\text{NaCl}$ ;  $\text{BaCl}_2$  + полимер,  $\text{BaCl}_2$ , а также емкостных элементов изготовленных на основе комплексных соединений. Параметрический преобразователь влажности с частотным выходом разработан на основе биполярной транзисторной структуры, что образует активную индуктивность с динамическим отрицательным сопротивлением, которая с влаговчувствительным конденсатором образует колебательный контур преобразователя. Математическое моделирование и экспериментальные исследования показали, что в диапазоне относительной

влажности от 30% до 100%, диапазон изменения емкости для влагочувствительного элемента на основе NaCl составляет от  $0,030 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двухслойной структуры на основе NaCl+полимер – от  $0,125 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. Для влагочувствительного элемента на основе BaCl<sub>2</sub> – диапазон изменения емкости составляет от  $0,060 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двухслойной структуры на основе BaCl<sub>2</sub>+полимер – от  $0,130 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. на основе экспериментальных исследований установлено, что на чувствительность сенсора влияет состав комплексных соединений, а именно чувствительного в диапазоне влажности от 7% до 27 % является емкостной элемент, который изготовлен на основе гетеро-металлического комплексного соединения II, содержит два атома сурьмы. Чувствительность такого емкостного элемента имеет значение 285 пФ/%. Зависимость емкости от относительной влажности в диапазоне от 30 % до 75 %, практически линейная, а чувствительность равна 135 пФ/%. В диапазоне 75...95 % наблюдается резкий рост чувствительности до 450 пФ/% для всех емкостных элементов, изготовленных на основе гетеро-металлических комплексных соединений I - IV. На основе математического моделирования получены графические зависимости функции преобразования и чувствительности частотного параметрического преобразователя влажности. Наибольшая чувствительность частотного параметрического преобразователя влажности от изменения влажности окружающей среды составляет 62...107 кГц /%.

Ключевые слова: частотный преобразователь влажности; влагочувствительный емкостной элемент; отрицательное дифференциальное сопротивление; функция преобразования; уравнения чувствительности.

A.V. OSADCHUK, L.V. KRILIK, I.A. OSADCHUK  
Vinnytsia National Technical University

### MATHEMATICAL MODEL OF A PARAMETRIC HUMIDITY TRANSDUCER WITH A FREQUENCY OUTPUT

A mathematical model of a frequency parametric humidity transducer with capacitive elements based on: NaCl+polymer, NaCl; BaCl<sub>2</sub>+polymer, BaCl<sub>2</sub>, as well as capacitive elements based on complex compounds. A parametric humidity transducer with a frequency output is developed on the basis of a bipolar transistor structure, which forms an active inductance with dynamic negative resistance, which forms an oscillatory circuit of the transducer with a humidity-sensitive capacitor. Mathematical modeling and experimental studies have shown that in the range of relative humidity from 30 % to 100 %, the range of capacitance change for a humidity sensitive element based on NaCl is from  $0.030 \cdot 10^{-8}$  F to  $3.9 \cdot 10^{-8}$  F, and for a two-layer structure based on NaCl+polymer - from  $0.125 \cdot 10^{-8}$  F to  $3.9 \cdot 10^{-8}$  F. For a moisture sensitive element based on BaCl<sub>2</sub> – the range of capacitance change is from  $0.060 \cdot 10^{-8}$  F to  $3.9 \cdot 10^{-8}$  F, and for a two-layer structure based on BaCl<sub>2</sub>+polymer - from  $0.130 \cdot 10^{-8}$  F to  $3.9 \cdot 10^{-8}$  F. On the basis of experimental studies it was found that the composition of complex compounds affects the sensitivity of the sensor, namely, the sensitive in the humidity range from 7 % to 27 % is a capacitive element, which is made on the basis of a hetero-metallic complex compound II, contains two antimony atoms. The sensitivity of such a capacitive element is 285 pF/%. The capacitance versus relative humidity in the range from 30 % to 75 % is almost linear, and the sensitivity is 135 pF/%. In the range of 75...95 %, there is a sharp increase in sensitivity up to 450 pF/% for all capacitive elements based on hetero-metallic complex compounds I – IV. On the basis of mathematical modeling, graphical dependences of the conversion function and sensitivity of the frequency parametric humidity

*transducer are obtained. The highest sensitivity of the frequency parametric humidity transducer from changes in the ambient humidity is 62 ... 107 kHz/%.*

*Keywords: frequency transducer of humidity; humidity sensitive; capacitive element; negative differential resistance; transformation function; sensitivity equations.*

### **Постановка проблеми**

В останні роки вдосконалення технологій виробництва сенсорів фізичних величин відбувалося за рахунок швидкісних, малопотужних та недорогих мікроелектронних інтегральних схем подальшої обробки, сучасних методів отримання та обробки інформативних сигналів, а також досягнення технологій мікромініатюризації [1–2]. Послідовне підвищення якості та надійності первинних параметричних перетворювачів фізичних величин потрібне для комерційної конкурентоспроможності. На даний час методи моделювання та автоматизованого проектування успішно використовуються для прогнозування та покращення вихідних параметрів радіоелектронних схем первинних параметричних перетворювачів перед впровадженням у масове виробництво, даючи можливість заощадити час і підвищити якість [3]. Мікромініатюризація сенсорних пристроїв надає численні переваги, такі як низький гістерезис, пакетне оброблення, простота інтеграції в поєднанні із наступним зменшенням витрат. Широке застосування параметричних первинних сенсорів вологості знайшли як в інтелектуальних системах так і в різних галузях промислової індустрії.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

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 [4–6]. В цьому випадку необхідно використовувати вологочутливий елемент у вигляді ємності, який є найоптимальнішим за сукупністю параметрів. Він забезпечує широкий діапазон вимірювань, високу надійність та низьку вартість при використанні мікроелектронної технології, яка дозволяє розробляти ємності планарного типу тонкоплівковим методом [7–8]. Завдяки цьому маємо мініатюрні габарити чутливого елемента, можливість розташування на кристалі спеціалізованої інтегральної схеми обробки сигналу [9–11]. Таким чином, для вимірювання вологості ємнісний метод є одним із найкращих.

### **Мета дослідження**

Метою роботи є розроблення та дослідження математичної моделі автогенераторного параметричного перетворювача на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, яка враховує його ємнісні та індуктивні властивості. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі: 1) провести аналіз та отримати аналітичний вираз для визначення залежності ємності вологочутливого елемента гребінцевої структури із захисним полімерним покриттям від відносної вологості навколишнього середовища; 2) отримати аналітичну залежність ємності вологочутливих елементів, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості навколишнього середовища; 3) визначити залежність резонансної частоти параметричного перетворювача вологості від параметрів схеми, а також отримати аналітичну залежність частоти від зміни вологості, при якій в коливальній системі генератора повністю компенсуються втрати енергії за рахунок від'ємного диференціального опору; 4) зробити висновки по проведеному дослідженню.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Метою роботи є розробка нового параметричного перетворювача вологості з частотним виходом з вологочутливим ємнісним елементом. Схема генератора синусоїдальних коливань на основі складового транзистора приведена на рис. 1. Він складається з підсилювача потужності, резонатора, що визначає частоту генерації, і ланцюга зворотного зв'язку. Підсилювач утворений транзисторами VT1 і VT2. Вхідний опір складового транзистора в схемі із загальною базою має індуктивний характер і разом із ємністю  $C_1$  утворить коливальний контур, що є резонатором. Для складового транзистора коефіцієнт підсилення по струму у визначеному частотному діапазоні має значення більше одиниці, що приводить до позитивного значення коефіцієнта зворотного зв'язку [4, 6]. Зворотний зв'язок по напрузі виявляється в складовому транзисторі сильніше, ніж в одиночному транзистора і це значною мірою полегшує самозбудження схеми.

Для експериментального дослідження схема параметричного перетворювача вологості (рис.1) була зібрана на транзисторній збірці BC847BDW1. Режим транзисторів VT1 і VT2 по постійному струму був таким: струм у ланцюзі емітера транзистора VT1 дорівнює 5,5 мА, а в ланцюзі емітера VT2 дорівнює 2,5 мА, напруга на колекторі – 5 В. Зовнішній базовий опір дорівнював 6 кОм. Цьому режиму відповідала частота генерації 760 кГц. При даній величині напруг живлення і опорів, схема генератора працювала в нормальному режимі, що відповідає синусоїдальній формі вихідної напруги. Описана схема генератора дозволяє одержати вихідну напругу до 15 В у широкому діапазоні частот. Нестабільність частоти дорівнює  $2 \cdot 10^{-4}$  Гц.

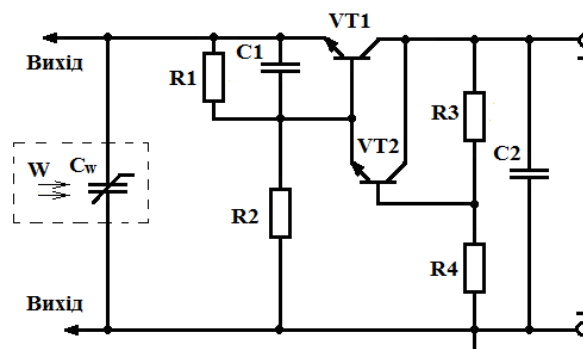


Рис. 1. Електрична схема перетворювача вологості з частотним виходом

Параметричний перетворювач вологості з частотним виходом розроблено на основі біполярної транзисторної структури (VT1, VT2), що утворює активну індуктивність з динамічним від'ємним опором, яка з вологочутливим конденсатором  $C_w$  утворює коливальний контур перетворювача. Конденсатор  $C_1$  та резистор  $R_3$  утворюють фазозсувне коло. За допомогою джерела постійної напруги схема вводиться в режим, коли на електродах емітер першого біполярного транзистора VT1 та база другого біполярного транзистора VT2 виникає динамічний від'ємний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі.

Резистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  та  $R_4$  забезпечують живлення схеми за постійним струмом, причому електричне живлення біполярної транзисторної структури (VT1, VT2) залежить від величини зміни ємності вологочутливого конденсатора  $C_w$  зі зміною вологості навколишнього середовища. Крім того, блокувальний конденсатор  $C_2$  запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги. При дії вологи на вологочутливий конденсатор  $C_w$  змінюється ємнісна складова повного

опору на електродах емітер першого біполярного транзистора VT1 та база другого біполярного транзистора VT2, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

В попередніх роботах авторами статті були проведені дослідження ємнісних вологочутливих елементів гребінцевої структури, створених на основі гігроскопічних солей  $NaCl$  та  $BaCl_2$  із захисним полімерним покриттям. Залежність ємності вологочутливого елемента від відносної вологості навколишнього середовища можна описати таким виразом:

$$C = \left( \theta^a \lg \varepsilon_{\text{соли}} + \varepsilon_{\text{пол}} \left( 1 + \frac{(1-\xi)}{1 - \frac{(1-\xi)}{3} + \frac{\varepsilon_{\text{пол}}}{\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{\text{пол}}}} \right) + \varepsilon_{\Pi} + \right. \\ \left. + \delta k \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) (1 - \theta^b) \lg \varepsilon_{H_2O} \right) \varepsilon_0 l [2A_1(N-1) + A_2], \quad (1)$$

$$\text{де} \quad \theta = \frac{S_M \sigma_{\text{соли}}}{S_M \sigma_{\text{соли}} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}}; \quad \xi = \frac{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}}}{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}} + V_{H_2O}};$$

$$A_1 = 3(d_{\Pi} / a)^{0,25} (b / d_{\Pi})^{0,44}; \quad A_2 = 0,77b / [(2N-1)(a+b)] + 0,41.$$

$S_M$  – площа меандру,  $\text{мм}^2$ ;  $\sigma_{\text{соли}}$  – товщина сольового покриття,  $\text{мкм}$ ;  $G$  – маса сухого повітря, г [12];  $\chi$  – величина, яка враховує зв'язок між масовим відношенням води і тиском пари [12];  $\rho_{H_2O}$  – густина води,  $\text{г/см}^3$ ;  $\varepsilon_{\text{соли}}$  – діелектрична проникність солі;  $\varepsilon_{\text{пол}}$  – діелектрична проникність поліметилметакрилату;  $S_{\text{пол}}$  – площа поліметилметакрилату;  $d_{\text{пол}}$  – товщина шару поліметилметакрилату;  $V_{H_2O}$  – об'єм води;  $\varepsilon_{H_2O}$  – діелектрична проникність води;  $\varepsilon_{\Pi}$  – діелектрична проникність підкладки;  $\delta$  – відносна маса водяної пари по відношенню до сухого повітря при однакових тисках і температурах;  $k = 1 \div 5$ ;  $b = 0,5 \div 1$  при умові, що  $a < b$ ;  $p_s$  – тиск насиченої пари при температурі  $T$ ; Па;  $A$  – психрометрична стала, яка при  $T_w = 20^\circ\text{C}$  становить 0,00064;  $P$  – тиск повітря 101,325 кПа (760 мм рт.ст.);  $T$  – температура навколишнього середовища,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_w$  – температура вологого термометра,  $^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_0$  – діелектрична стала вакууму,  $\text{Ф/м}$ ;  $l, a, b$  – величини, які враховують геометрію конденсатора,  $\text{мм}$ ;  $N$  – число секцій.

На основі аналітичного виразу (1) отримано графічні залежності ємності вологочутливого елемента від відносної вологості, які подано на рис. 2.

З графіків (див. рис. 2) видно, що в діапазоні 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  $NaCl$ +полімер – від  $0,125 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. Для вологочутливого елемента на основі  $BaCl_2$  – діапазон

зміни ємності становить від  $0,060 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової структури на основі  $\text{BaCl}_2$ +полімер – від  $0,130 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф.

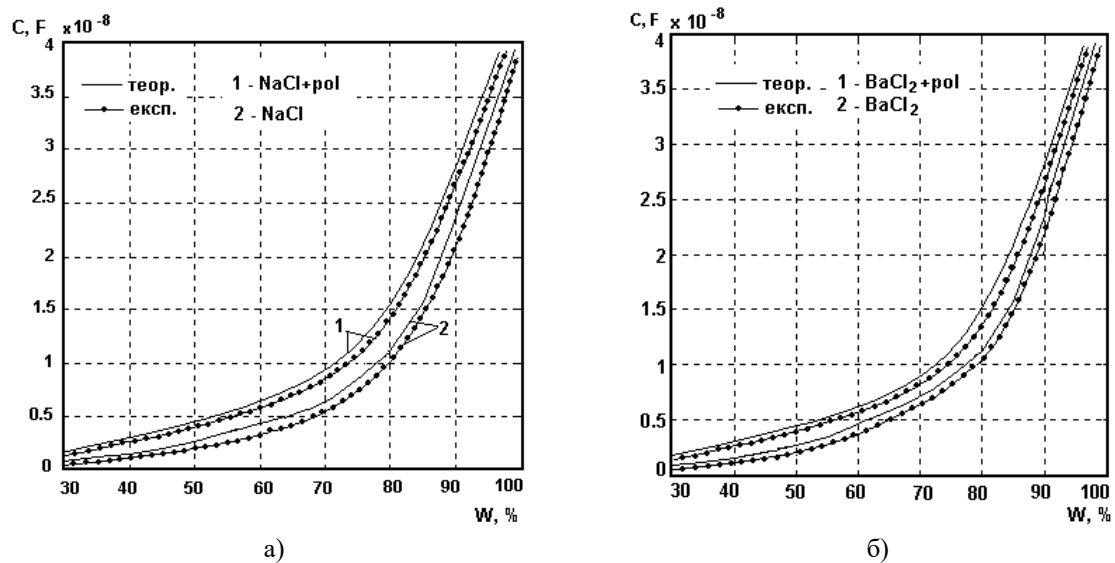


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності ємності вологочутливих елементів від зміни відносної вологості повітря, виготовлених: а – на основі  $\text{NaCl}$ +полімер та  $\text{NaCl}$ ; б – на основі  $\text{BaCl}_2$ +полімер та  $\text{BaCl}_2$ .

Експериментальні дослідження показали, що створення захисного шару з метою запобігання випадіння точки роси зменшило діапазон зміни ємності [12]. Крім того, ці вологочутливі елементи працюють тільки в обмеженому діапазоні відносної вологості нижче точки роси. Тому для вирішення цієї проблеми, як вологочутливий шар ємнісного елемента, було використано гетерометалеві комплексні сполуки – стибій або бісмутвісні діоксидати ніколу (II). Ці сполуки практично нерозчинні в спиртах, ацетоні, бензині, погано розчинні в диметилформаміді і диметилсульфоксиді. Однак є гігроскопічними і змінюють забарвлення із зміною відносної вологості навколишнього середовища [12].

Залежність ємності вологочутливих елементів, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості навколишнього середовища можна описати таким виразом:

$$C = \left( \Omega^a \lg \varepsilon_{K.C.} + \varepsilon_{II} + 1 + \delta k \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) (1 - \Omega^b) \lg \varepsilon_{H_2O} \right) \varepsilon_0 l [2A_1(N - 1) + A_2], \quad (2)$$

$$\text{де} \quad \Omega = \frac{S_M \sigma_{K.C.}}{S_M \sigma_{K.C.} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}};$$

$\sigma_{K.C.}$  – товщина нанесеного шару комплексної сполуки, мкм;  $\varepsilon_{K.C.}$  – діелектрична проникність комплексної сполуки.

На основі аналітичного виразу (2) отримано графічні залежності ємності вологочутливого елемента, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості, які подано на рис. 3.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що на чутливість сенсора впливає склад комплексних сполук, а саме найчутливішим в діапазоні вологості від 7 % до 27 % є ємнісний елемент виготовлений на основі гетерометалевої комплексної сполуки II, яка містить два атома стибію. Чутливість такого ємнісного елемента набуває значення 285 пФ/%. Залежність ємності від відносної вологості, в діапазоні від 30 % до 75 %, практично лінійна, а чутливість дорівнює 135 пФ/%. В діапазоні 75...95 % спостерігається різке зростання чутливості аж до 450 пФ/% для всіх ємнісних елементів виготовлених на основі гетерометалевих комплексних сполук I – IV.

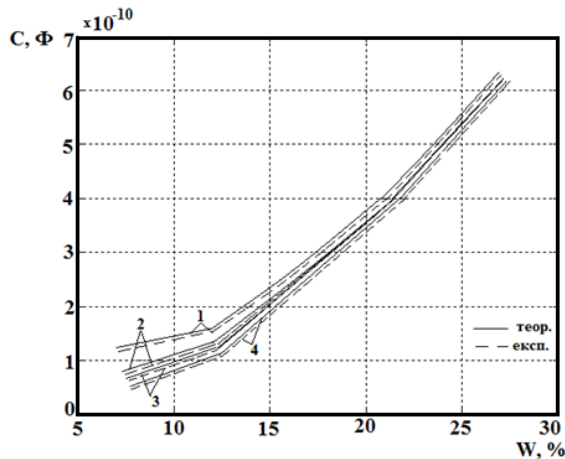


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні залежності ємності від відносної вологості повітря в діапазоні 7...27% для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

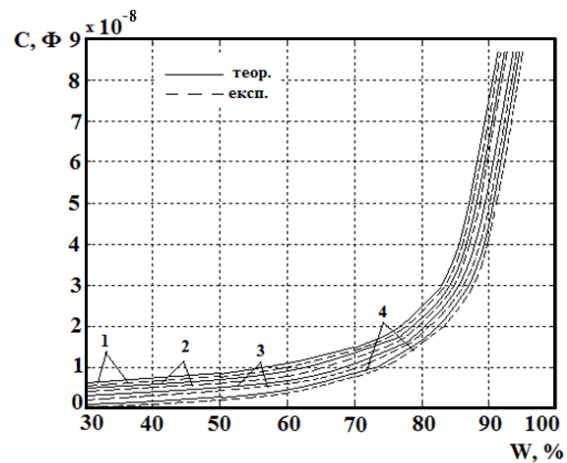


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності ємності від відносної вологості повітря в діапазоні 30...95% для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

На основі електричної схеми перетворювача вологості з частотним виходом (рис.1) з вологочутливим конденсатором, використовуючи метод Ляпунова [13], по колу позитивного зворотного зв'язку отримано рівняння, на основі якого визначено аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{-6C_W(W) \pm 2\sqrt{9C_W^2(W) - 4R_{B2}^2C_{EB2}^2 - 4R_{B1}^2C_{EB1}^2}}{2\pi(4R_{B2}^2C_{EB2}^2 + 4R_{B1}^2C_{EB1}^2)}, \quad (3)$$

де  $C_W(W)$  – ємність вологочутливого конденсатора;  $C_{EB1}$ ,  $C_{EB2}$  – ємності  $p$ - $n$  переходів емітер-база біполярних транзисторів VT1 та VT2;  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  – опір бази біполярних транзисторів VT1 та VT2.

Чутливість параметричного перетворювача вологості з частотним виходом з вологочутливим ємнісним елементом визначається на підставі виразу (3) і описується рівнянням

$$S_W^F = \frac{-6\left(\frac{\partial}{\partial W}C_W(W)\right) \pm 18 \frac{C_W(W)\left(\frac{\partial}{\partial W}C_W(W)\right)}{\sqrt{9C_W^2(W) - 4R_{B2}^2C_{EB2}^2 - 4R_{B1}^2C_{EB1}^2}}}{2\pi(4R_{B2}^2C_{EB2}^2 + 4R_{B1}^2C_{EB1}^2)}. \quad (4)$$

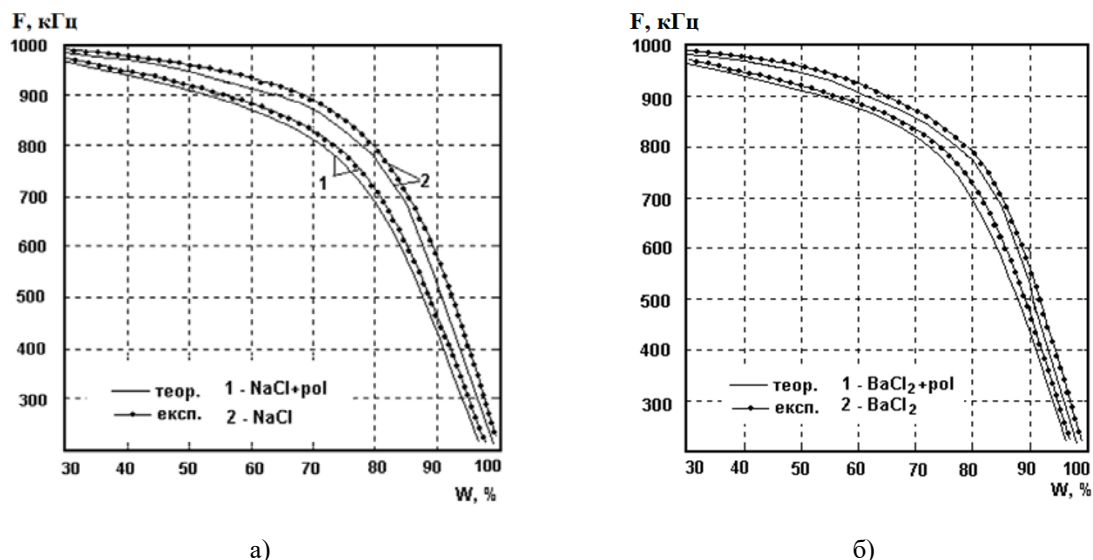


Рис. 5. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача вологості з вологочутливими елементами, виготовлених: а – на основі NaCl+полімер та NaCl; б – на основі BaCl<sub>2</sub>+полімер та BaCl<sub>2</sub>.

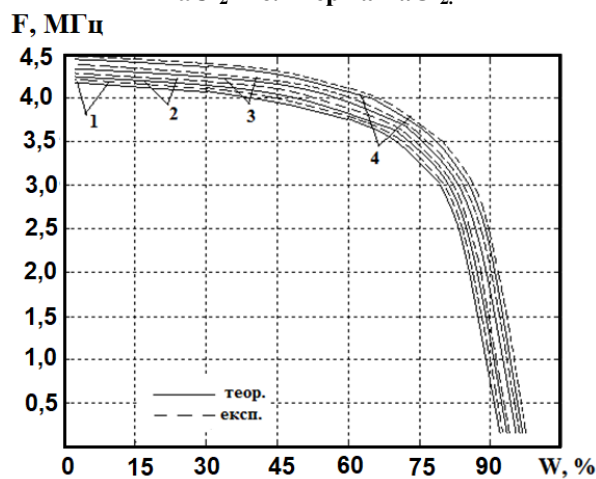


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача вологості в діапазоні 7...95 % з ємнісними елементами виготовленими на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

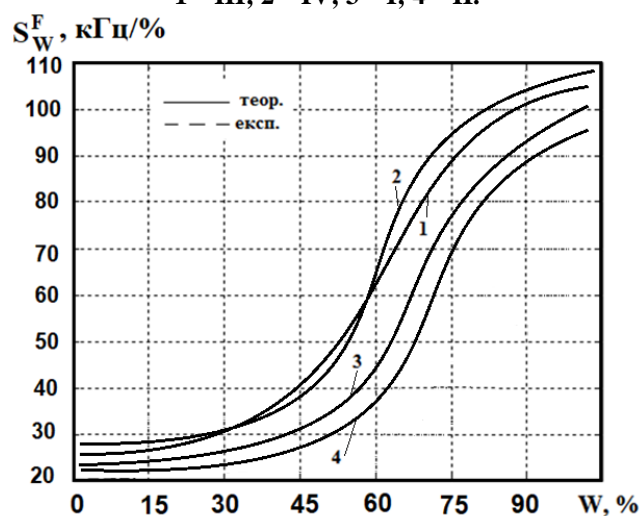


Рис. 7. Теоретичні залежності чутливості перетворювача вологості від відносної вологості повітря в діапазоні 7...95 % з ємнісними елементами виготовленими на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II



Графік залежності частоти генерації параметричного перетворювача вологості з частотним виходом від зміни вологості навколишнього середовища наведено на рис.5 та рис.6, а залежність чутливості параметричного перетворювача вологості з вологочутливим ємнісним елементом подано на рис. 7. Як видно з графіка, найбільша чутливість параметричного перетворювача вологості з частотним виходом для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук (IV) та лежить у діапазоні від 60 до 95 % відносної вологості повітря і становить 62...107 кГц/%.

### Висновки

Розроблено математичну модель частотного параметричного перетворювача вологості з ємнісними елементами виготовленими на основі:  $NaCl$ +полімер,  $NaCl$ ;  $BaCl_2$ +полімер,  $BaCl_2$ , а також ємнісних елементів виготовленими на основі комплексних сполук. На основі математичного моделювання отримано графічні залежності функції перетворення та чутливості частотного параметричного перетворювача вологості. Найбільша чутливість частотного параметричного перетворювача вологості для зміни вологості навколишнього середовища становить 62...107 кГц/%.

### Список використаної літератури

1. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes. *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Vol. 114. № 1. P. 254–262.
2. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. Москва: Техносфера, 2007. 384 с.
3. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012. 624 с.
4. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница: «Универсум-Винница», 1999. 275 с.
5. Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Osadchuk I. A., Seletska O. O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of Photoreactive Effect in Bipolar and MOSFET Transistors. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. Vol. 11176. (Poland, Wilga, May 27 – June 2, 2019), pp. 111761I-1–111761I-12.
6. Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Osadchuk I. A., Kolimoldayev Maksat, Komada Paweł, Mussabekov Kanat. Optical Transducers with Frequency Output. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*. Vol. 10445. (Poland, Wilga, May 28 – June 6, 2017), pp. 10445-129–10445-132.
7. Farahani H., Wagiran R., Hamidon M. N. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2014. Vol. 14. Issue 5. P. 7881–7939.
8. Pelino M., Cantalini C. Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Electronic Components*. 1994. Vol. 16. P. 69–87.
9. Tripathy Ashis, Pramanik Sumit, Manna Ayan, Bhuyan Satyanarayan, Shah Nabila Farhana Azrin, Radzi Zamri, Osman Noor Azuan Abu. 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. *Sensors*. 2016. Vol. 16. Issue 7. P. 1135-1–135-18.
10. Lazarus Nathan, Bedair Sarah S., Lo Chiung-C., Fedder Gary K. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of Microelectromechanical System*. 2010. Vol. 19, № 1. P. 183 –191.
11. Zhi, Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. 2005. Vol. 3. № 4. P. 274 –295.

12. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В. Сенсори вологості: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2003. 208 с.
13. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники. Москва: Высшая школа, 1988. 464 с.

### References

1. Bozhi, Yang, Burak, Aksak, Qiao, Lin, & Metin Sitti. (2006). Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes. *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. **114**, 1, 254–262.
2. Dzheksan, R. G. (2007). *Novejshie datchiki*. Moskva: Tekhnosfera.
3. Sharapova, V. M., & Polishhuka, E. S. (Eds.) (2012). *Datchiki: Spravochnoe posobie*. Moskva: Tekhnosfera.
4. Osadchuk, V. S., & Osadchuk, O. V. (1999). Reaktyvni vlastyivosti tranzystoriv i tranzystornykh skhem: monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia».
5. Osadchuk, A. V., Osadchuk, V. S., Osadchuk, I. A., Seletska, O. O., Kisala, P., & Nurseitova, K. (2019). Theory of Photoreactive Effect in Bipolar and MOSFET Transistors. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. Vol. 11176. (Poland, Wilga, May 27 – June 2, 2019), pp. 111761I-1–111761I-12.
6. Osadchuk, A. V., Osadchuk, V. S., Osadchuk, I. A., Kolimoldayev, Maksat, Komada, Pawel, & Mussabekov, Kanat. (2017). Optical Transducers with Frequency Output. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*. Vol. 10445. (Poland, Wilga, May 28 – June 6, 2017), pp. 10445-129–10445-132.
7. Farahani, H., Wagiran, R., & Hamidon, M. N. (2014). Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. **14**, 5, 7881–7939.
8. Pelino M., & Cantalini C. (1994). Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Electronic Components*. 16, 69–87.
9. Tripathy, Ashis, Pramanik, Sumit, Manna, Ayan, Bhuyan, Satyanarayan, Shah, Nabila Farhana Azrin, Radzi, Zamri, & Osman, Noor Azuan Abu. (2016). 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. *Sensors*. **16**, 7, 1135-1–135-18.
10. Lazarus, Nathan, Bedair, Sarah S., Lo, Chiung-C., & Fedder, Gary K. (2010). CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of Microelectromechanical System*. **19**, 1, 183 –191.
11. Zhi, Chen, & Chi Lu. (2005). Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. **3**, 4, 274 –295.
12. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., & Krylyk L. V. (2003). Sensory volohosti: monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia».
13. Kayatskas, A. A. (1988). *Osnovy radyoelektroniki*. Moskva, Vysshaya shkola.

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6662-9141.

Крилик Людмила Вікторівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Вінницького національного технічного університету, e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com.

Осадчук Ярослав Олександрович – к.т.н., доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com.