

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 681.2.08

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/44>

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук О.В.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук В.С.

Вінницький національний технічний університет

ВОЛОГОЧУТЛИВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА ОСНОВІ МДН-СТРУКТУР З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Досліджено основні параметри перетворювачів вологості з частотним виходом, конструкція яких будується на основі транзисторних структур з диференціальним від'ємним опором. В якості первинних перетворювачів вологості виступають МДН-конденсатор і МДН-польовий транзистор. Схема приладу вимірювання вологості спрощена за рахунок використання первинних перетворювачів як пасивних, так і активних елементів автогенератора.

Виходячи з принципу перетворення енергії постійного електричного поля в енергію змінного електричного поля розроблено математичні моделі приладів вимірювання вологості, що дозволило отримати функції перетворення і чутливості приладів без використання складного методу розрахунку рівнянь Кірхгофа з еквівалентних схем перетворювачів та їх розв'язку на сучасних комп'ютерах.

Основний внесок у зміну функції перетворення та чутливості вносить зміна вологості, яка змінює еквівалентну ємність і диференціальний від'ємний опір у коливальному контурі автогенераторів, що відповідно, змінює вихідну частоту вимірювальних пристроїв. Чутливість вологочутливих перетворювачів змінюється від 6,75 кГц/% до 9,18 кГц/% в діапазоні зміни вологості від 0,1% до 99,9%.

Розраховані аналітичні вирази параметричних функцій перетворення та чутливості демонструють вплив елементів первинних вимірювальних перетворювачів та елементів автогенераторних параметричних перетворювачів на вихідну частоту приладів. Вологочутливі перетворювачі з частотним вихідним сигналом не потребують аналого-цифрових перетворювачів і підсилювальних пристроїв при подальшій обробці вихідних інформаційних сигналів, що значно здешевлює інформаційно-вимірювальні прилади та системи.

Ключові слова: волога, перетворювач, частота, автогенератор, МДН-структура.

Постановка проблеми. Подальший розвиток науково-технічного прогресу вимагає стрімкого розвитку приладобудування на основі використання досягнень сучасних мікро- і нанотехнологій. Використання нових фізичних явищ і нових принципів реалізації дозволяє розробляти і створювати прилади для вимірювання вологості для різноманітних галузей промисловості. Необхідність створення такого класу приладів виникає через залежність багатьох технологічних процесів від вологості в таких галузях промислової індустрії, як металургія, енергетика, авіаційна та космічна техніка, хімічна і нафтогазова промисловість, військова техніка [1; 2; 3; 4, с. 10–54; 5; 6, с. 12–14; 7, с. 11–18; 8].

На теперішній час спостерігається високий рівень розвитку сучасних контрольно-вимірювальних приладів і систем для вимірювання вологості, що включають в себе засоби обчислювальної техніки з використанням мікропроцесорних засобів вимірювань з вбудованими цифровими блоками опрацювання і керування [1; 9; 10, с. 3–54].

Більшість існуючих перетворювачів вологості мають вихідний інформативний сигнал у вигляді напруги чи струму, що призводить до значних похибок при вимірюванні внаслідок втрат інформаційного сигналу в каналі між виходом вимірювального перетворювача і входом підсилювально-

перетворюючого пристрою апаратури, малих потужностей вихідного сигналу, їх низької завадостійкості та швидкодії [11; 12].

Усунути вище перераховані вади можливо на основі автогенераторних мікроелектронних перетворювачів, що працюють в режимі перетворення «вологість-частота», що значно покращує їх метрологічні показники [13; 14].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Одним з перспективних напрямків у створенні вологочутливих перетворювачів є дослідження реактивних властивостей напівпровідникових транзисторних конструкцій з диференційним від'ємним опором, що дозволяє створювати пристрої та системи з частотним вихідним сигналом. Мікроелектронні автогенераторні вологочутливі перетворювачі поєднують простоту і універсальність, якими володіють аналогові вимірювальні прилади, з точністю і завадостійкістю, які притаманні приладам з кодовим вихідним сигналом. Застосування принципу перетворення «волога-частота», на основі мікроелектронних автогенераторних перетворювачів суттєво зменшує собівартість комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних приладів і систем та дозволяє значною мірою зменшити масогабаритні показники розроблюваних пристроїв, а також підвищити точність та чутливість перетворення інформативного вологочутливого сигналу у частоту [15; 16; 17; 18; 19; 20, с. 84–109].

Постановка проблеми. Метою роботи є створення та дослідження вологочутливих перетворювачів на основі мікроелектронних транзисторних конструкцій, в яких вологочутливі МДН-конденсатор і МДН-транзистор виступають як первинні перетворювачі вологочутливого сигналу, так і як компоненти автогенераторів, у яких втрати енергії в коливальному контурі компенсуються енергією диференційного від'ємного опору, що дозволяє перетворювати інформативний вологочутливий сигнал у зміну вихідної частоти пристрою. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

1) провести аналіз існуючих, на даний час, наукових джерел та обґрунтувати використання напівпровідникових мікроелектронних транзисторних схем з диференційним від'ємним опором для побудови вологочутливих перетворювачів з частотним виходом;

2) розробити математичні моделі вологочутливих перетворювачів, в яких враховано залежність параметрів автогенераторів і вологочутливих елементів від дії вологи та їх вплив на вихідну частоту перетворювачів;

3) отримати аналітичні вирази параметричної залежності функцій перетворення та чутливості від дії інформативного вологочутливого сигналу;

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Математичні моделі вологочутливих перетворювачів.

Вологочутливий перетворювач з частотним вихідним сигналом будується на основі мікроелектронної транзисторної структури з диференційним від'ємним опором, в якій вологочутливим елементом виступає МДН-(метал-діелектрик-напівпровідник) конденсатор $C1$. На рис. 1 подано схему мікроелектронного вологочутливого перетворювача.

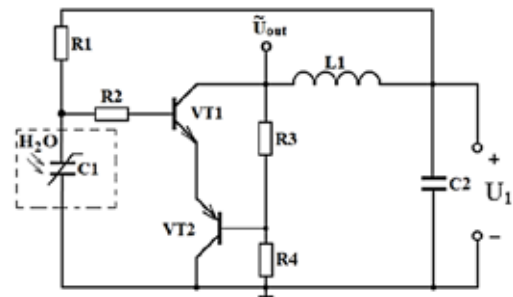


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного вологочутливого перетворювача

Вона складається з біполярних транзисторів $VT1$ та $VT2$ з різними типами провідності базових областей, що утворює спадну ділянку на вольт-амперній характеристиці на вихідних клеммах вологочутливого перетворювача. Спадній ділянці відповідає диференційний від'ємний опір. Живлення перетворювача здійснюється від джерела постійної напруги $U1$ через резистори $R1$ - $R4$. Конденсатор $C2$ запобігає проходженню змінного струму в джерело живлення $U1$. Коливальний контур утворений пасивною індуктивністю $L1$ та ємністю повного опору транзисторної схеми, що існує на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів $VT1$ та $VT2$. Під час дії вологи на МДН-конденсатор $C1$ здійснюється зміна активної та реактивної складових імпедансу на електродах колектор-колектор транзисторної схеми, що викликає зміну вихідної частоти вологочутливого перетворювача. Вологочутливим первинним елементом слугує МДН-конденсаторна структура. Активним шаром такої структури є шар пористого кремнію SiO_2 , який формується анодним розчиненням кремнію в плавиковій кислоті. Розмір пор складає 2–15 нм, пористість становить від 20% до 80% вихідного матеріалу [21]. На зовнішній шар пористого кремнію напильується нанометровий шар золота, який добре пропускає молекули води, одночасно він слугує металевим електродом,

до якого приварюється омичний контакт. Другий золотий металічний контакт напильється на напівпровідник з кремнію, який є підкладкою, на якій зроблено пористу структуру SiO₂.

Загальна ємність вологочутливої МДН-структури визначається ємністю ізолюючої вологочутливого шару SiO₂, ємністю структури метал-напівпровідник, ємністю напівпровідника при нульовому значенні відносної вологості і ємностей, обумовлених захопленими поверхневими зарядами [22; 23; 24]. У нашому випадку, зміну загальної ємності вологочутливої МДН-структури від зміни відносної вологості буде визначати зміна ємності вологочутливої ізолюючої пористої структури SiO₂, яка описується формулою [25]

$$C(W) = \frac{S}{d} [\varepsilon_{SiO_2}(1 - P) + \varepsilon_0 (Pl(1 - \eta) + P(1 - l)) + \varepsilon_{H_2O}Pl\eta], \quad (1)$$

де S – площа електрода, d – товщина пористого шару, ε_{SiO_2} , ε_0 , ε_{H_2O} – діелектричні сталі окису кремнію, вакууму і води, відповідно, $P = S_{пор} / S$ – параметр, який характеризує ступінь пористості, $S_{пор}$ – площа перерізу пор, паралельна площі електрода, η – ступінь заповнення пор водою, l – відношення площі доступних до води пор до їх загальної кількості. Згідно формули (1), визначимо зміну вологочутливої ємності $C(W)$ від зміни відносної вологості. В загальному вигляді вона описується виразом

$$\frac{\partial C(W)}{\partial W} = \frac{\partial C(W)}{\partial P} \Delta P(W) + \frac{\partial C(W)}{\partial l} \Delta l(W) + \frac{\partial C(W)}{\partial \eta} \Delta \eta(W). \quad (2)$$

Провівши диференціювання у виразі (2), отримуємо формулу

$$\Delta C(W) = \frac{S}{d} \left[\begin{aligned} & -\varepsilon_{SiO_2} + \varepsilon_0(1 - l\eta)\Delta P(W) + \\ & + (\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_0)P\eta\Delta l(W) + (\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_0)Pl\Delta \eta(W) \end{aligned} \right]. \quad (3)$$

Визначимо параметричну залежність вихідної частоти перетворювача від параметрів вологочутливої МДН-ємності і параметрів автогенераторного перетворювача. Під час вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії молекул води у енергію змінного електричного поля на виході перетворювача, тому визначимо коефіцієнт корисної дії вологочутливого перетворювача. Спочатку енергія молекул води перетворюється в енергію постійного електричного поля у вологочутливому конденсаторі, яка є вхідною енергією для автогенератора. В подальшому енергія постійного електричного поля у вологочутливому конденсаторі перетворюється в енергію змінного електричного поля. Ця енергія пов'язана з еквівалентною ємністю коливального контуру параметричного автогенераторного перетворювача. Коефіцієнт корисної дії вологочутливого перетворювача має вигляд

$$K = \frac{P_{вих}}{P_{ex}}. \quad (4)$$

Вихідна потужність вологочутливого перетворювача описується виразом

$$P_{вих} = \frac{C_{екв}U_-^2}{2t_2}, \quad (5)$$

де $C_{екв}$ – еквівалентна ємність коливального контуру вологочутливого перетворювача, t_2 – період коливань, U_- – вихідна змінна напруга. Вхідна потужність описується формулою

$$P_{ex} = \frac{C(W)U_-^2}{2t_1}, \quad (6)$$

де U_- – постійна напруга на вологочутливій ємності МДН-структури, t_1 – час зміни відносної вологості на вологочутливій структурі. Отже, коефіцієнт корисної дії приладу приймає вигляд

$$K = \frac{C_{екв}U_-^2t_1}{C(W)U_-^2t_2}, \quad (7)$$

З формули (7) визначається $C_{екв}$, яка описується виразом

$$C_{екв} = \frac{KC(W)U_-^2t_2}{U_-^2t_1}, \quad (8)$$

Також еквівалентну ємність вологочутливого перетворювача можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [20, с. 63; 26]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{екв}} \left[\frac{R_g^2 C_{екв}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

де R_g – диференційний від'ємний опір у коливальному контурі, L – індуктивність контуру. З виразу (9) отримуємо квадратне рівняння, на підставі якого визначаємо еквівалентну ємність $C_{екв}$,

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{екв}^2 - R_g^2 C_{екв} + L = 0. \quad (10)$$

Введемо позначення

$$m_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (11)$$

$$m_2 = R_g^2, \quad (12)$$

$$m_3 = L, \quad (13)$$

$$m_4 = C_{екв} = \frac{KC(W)U_-^2t_2}{U_-^2t_1}, \quad (14)$$

тоді $C_{екв}$ з рівняння (10) дорівнює

$$C_{екв} = \frac{m_2 \pm \sqrt{m_2^2 - 4m_1 m_3}}{2m_1}. \quad (15)$$

Прирівнявши вираз (15) до виразу (8), отримуємо рівняння для визначення F_0 , яке має вигляд

$$m_1 = \frac{m_2}{m_4} - \frac{m_3}{m_4^2}. \quad (16)$$

Підставивши значення виразів (11)–(14) у формулу (16), отримуємо рівняння

$$4\pi^2 R_g^2 L F_0^2(W) = \frac{R_g^2 U_-^2 t_1}{KC(W)U_-^2 t_2} - \frac{U_-^2 t_1^2 L}{K^2 C^2(W)U_-^4 t_2^2}. \quad (17)$$

Зрівняння (17) визначає параметричну залежність вихідної частоти приладу від параметрів

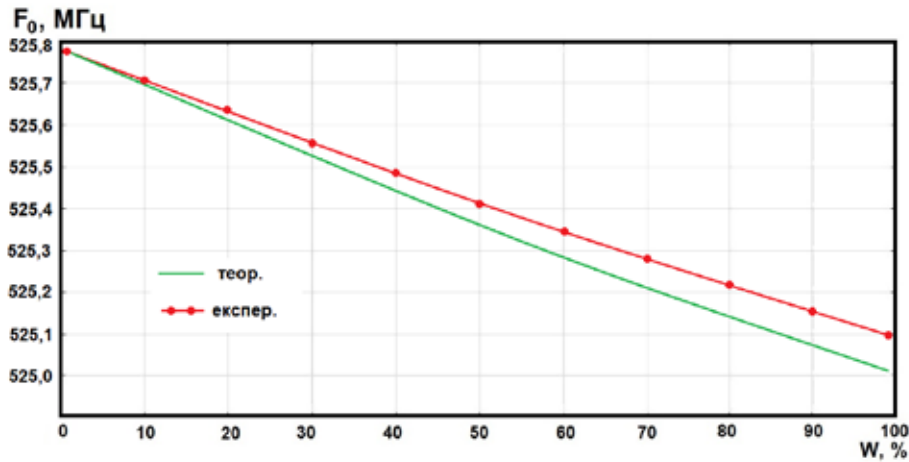


Рис. 2. Залежність функції перетворення приладу від зміни вологості

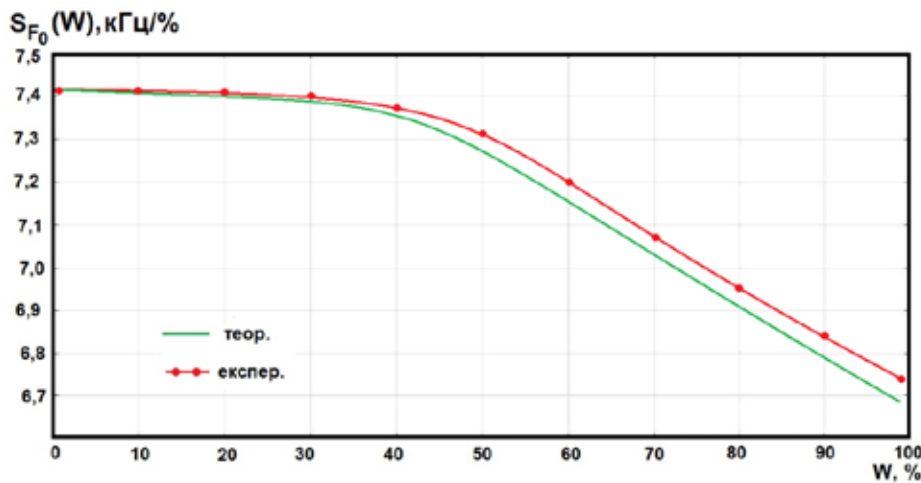


Рис. 3. Залежність функції чутливості приладу від вологості

первинного перетворювача вологи і параметрів автогенератора, де величина $F_0(W)$ є функцією перетворення вологочутливого приладу, отже

$$F_0(W) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_-^2 t_1}{KC(W)U_-^2 t_2 L} - \frac{U_-^4 t_1^2}{K^2 C^2(W)U_-^4 t_2^2 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (18)$$

Отримана формула (18) дозволяє досить простим шляхом визначити функцію перетворення приладу, а ніж складним шляхом з нелінійної еквівалентної схеми вологочутливого перетворювача на основі системи рівнянь Кірхгофа, які розв'язуються на комп'ютері чисельним методом.

На рис. 2 наведено графічну залежність експериментальної та розрахункової кривих параметричної функції перетворення вологочутливого приладу.

Як видно з рис. 2, при зміні вологості від 0,1% до 99,9% вихідна частота перетворювача змінювалась від 525,78 МГц до 525,10 МГц.

Чутливість приладу визначається похідною функції (18) за параметром вологості W . На

підставі експериментальних досліджень видно, що вихідна змінна напруга U_- , а також постійна напруга U_+ залежать від зміни вологості, що також необхідно врахувати при визначенні чутливості вологочутливого перетворювача. На підставі цього зауваження, функція (18) приймає вигляд

$$F_0(W) = \frac{1}{2\pi} [U_-^2 C^{-1}(W) U_-^{-2}(W) m_5 - U_-^4(W) C^{-2}(W) U_-^{-4}(W) m_6]^{1/2}. \quad (19)$$

де

$$m_5 = \frac{t_1}{K t_2 L}, \quad (20)$$

$$m_6 = \frac{t_1^2}{K^2 t_2^2 R_g^2}, \quad (21)$$

тоді з врахуванням (19)–(21), функція чутливості перетворювача описується формулою

$$s_{F_0}(W) = \frac{1}{4\pi} [U_-^2 C^{-1}(W) U_-^{-2}(W) m_5 - U_-^4(W) C^{-2}(W) U_-^{-4}(W) m_6]^{-1/2} \times \\ \times \left\{ \left[2U_-(W) \frac{dU_-(W)}{dW} C^{-1}(W) U_-^{-2}(W) + U_-^2(W) \left(-C(W) \frac{dC(W)}{dW} U_-^{-2}(W) - 2U_-^2(W) \frac{dU_-(W)}{dW} C^{-1}(W) \right) \right] m_5 - \right. \\ \left. - \left[U_-^2(W) \left(-2C^2(W) \frac{dC(W)}{dW} U_-^{-4}(W) - 4U_-^2(W) \frac{dU_-(W)}{dW} C^{-2}(W) \right) + 4U_-^2(W) \frac{dU_-(W)}{dW} C^{-2}(W) U_-^{-4}(W) \right] m_6 \right\}. \quad (22)$$

Графік чутливості перетворювача від зміни вологості подано на рис. 3.

Як видно з рис. 3, чутливість вологочутливого перетворювача складала від 6,75 кГц/% до 7,41 кГц/% в діапазоні зміни вологості від 0,1% до 99,9%.

Перейдемо до розгляду параметрів вологочутливого перетворювача на основі мікроелектронного автогенераторного приладу з використанням в якості первинного перетворювача вологості польового транзистора з індукованим каналом. Електрична схема вологочутливого перетворювача подано на рис. 4.

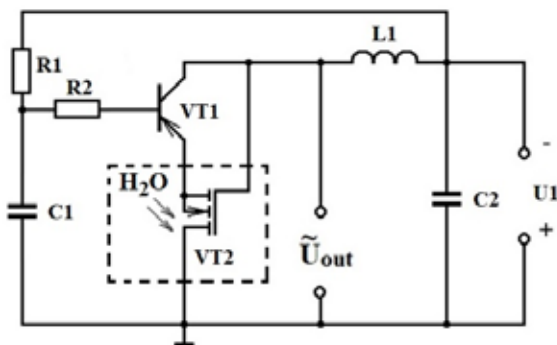


Рис. 4. Електрична схема параметричного вологочутливого перетворювача

Вона складається з біполярного транзистора VT1 та польового транзистора з вологочутливим затвором VT2, який є вологочутливим елементом. Живлення схеми з постійного струму відбувається через резистори R1 та R2 від джерела постійної напруги U1. Додатковий позитивний зворотний зв'язок у схемі здійснюється за рахунок електричного кола R2C1, що збільшує диференційний від'ємний опір на електродах колектор VT1 та стік VT2. На цих електродах існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна ємнісний характер. Підключення індуктивності L1 до колектора VT1 та верхнього виводу ємності C2 створює коливальний контур, втрапи енергії в якому компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. Конденсатор C2 запобігає проходженню змінного струму в джерело живлення U1. Резонансна частота коливального контуру вологочутливого перетворювача залежить від дії вологи на вологочутливий польовий транзистор VT2, оскільки змінюється його струм, що приводить до зміни еквівалентної ємності і від'ємного диференційного у коливальній системі автогенератора перетворювача. Зміна струму у каналі польового транзистора VT2 відбувається за рахунок зміни ємності підзатворного

вологочутливого діелектрика і зміни порогової напруги при дії вологи.

Розглянемо роботу польового вологочутливого транзистора з індукованим каналом VT2 у режимі насичення, при цьому величина струму стоку має вигляд [27, с. 305]

$$I_{C_{нас}} = \frac{Z\mu_n C(W)}{2L_{кан}} [U_3 - U_{пор}(W)]^2, \quad (23)$$

де Z – ширина каналу польового транзистора, μ_n – рухливість електронів в напівпровідниковому матеріалі, $C(W)$ – ємність підзатворного вологочутливого діелектрика на одиницю площі, $L_{кан}$ – довжина каналу польового транзистора, U_3 – напруга на заслоні, $U_{пор}(W)$ – порогова напруга польового транзистора утворення інверсного каналу. За врахуванням виразу (23), опір каналу вологочутливого транзистора при дії вологи описується виразом

$$R_{кан}(W) = \frac{2U_{св} L_{кан}}{Z\mu_n C(W) [U_3 - U_{пор}(W)]^2}, \quad (24)$$

де $U_{св}$ – напруга на стоці польового транзистора відносно витоку. Зміна опору каналу вологочутливого польового транзистора при дії вологи з врахуванням виразу (24) приймає вигляд

$$\Delta R_{кан}(W) = \frac{\partial R_{кан}}{\partial C(W)} \Delta C(W) + \frac{\partial R_{кан}}{\partial U_{пор}(W)} \Delta U_{пор}(W). \quad (25)$$

Виконавши диференціювання у формулі (25), отримуємо вираз

$$R_{кан}(W) = - \frac{2U_{св} L_{кан}}{Z\mu_n C^2(W) [U_3 - U_{пор}(W)]^2} \Delta C(W) - \frac{4U_{св} L_{кан}}{Z\mu_n C(W) [U_3 - U_{пор}(W)]^3} \Delta U_{пор}(W) \quad (26)$$

Визначивши залежність зміни опору каналу вологочутливого транзистора VT2 від дії вологи, перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти приладу від зміни вологи. Ця залежність визначається аналогічним чином, як і для вологочутливого перетворювача з вологочутливим МДН-конденсатором, яка розглянута вище. Вхідна потужність для автогенератора визначається на основі виразів (23) і (24), отже

$$P_{вх} = \frac{Z\mu_n C(W) [U_3 - U_{пор}(W)]^2 U_{св}}{2L_{кан}}, \quad (27)$$

Вихідна потужність визначається формулою (5). Таким чином, виходячи з формул (8) і (27), коефіцієнт корисної дії перетворювача дорівнює

$$K = \frac{C_{екв} U_{св}^2 L_{кан}}{Z\mu_n t_2 C(W) [U_3 - U_{пор}(W)]^2 U_{св}}. \quad (28)$$

З рівняння (28) визначається величина еквівалентної ємності коливального контуру автогенератора $C_{екв}$, яка має вигляд

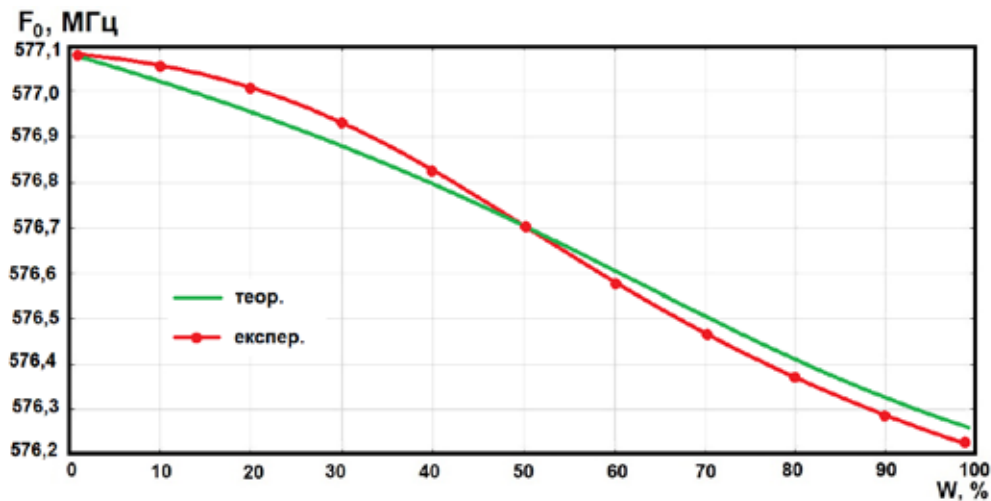


Рис. 5. Залежність функції перетворення приладу від вологості

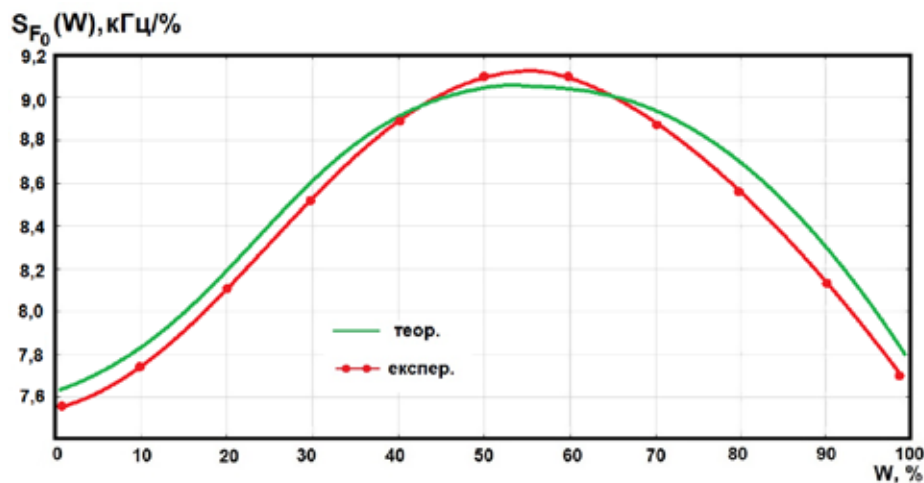


Рис. 6. Залежність функції чутливості приладу від вологи

$$C_{екв} = \frac{KU_{св}Z\mu_n t_2 C(W) [U_3 - U_{нор}(W)]^2}{U_{кан}^2 L} \quad (29)$$

З іншого боку, еквівалентна ємність коливального ланцюга авто-генераторного перетворювача пов'язана з вихідною частотою виразом (9). Підставивши у вираз (9) рівняння (29) та провівши необхідні математичні перетворення, ми отримуємо параметричну залежність вихідної частоти вологочутливого перетворювача від зміни параметрів вологочутливого польового транзистора та параметрів автогенератора. Ця залежність описується рівнянням

$$F_0(W) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{кан}^2 L}{KU_{св} t_2 Z \mu_n C(W) [U_3 - U_{нор}(W)]^2 L} - \frac{U_{кан}^2 L}{K^2 U_{св}^2 t_2^2 Z^2 \mu_n^2 C^2(W) [U_3 - U_{нор}(W)]^4 R_g^2} \right]^{1/2} \quad (30)$$

Вираз (30) є параметричною функцією перетворення вологочутливого приладу. На рис. 5 подано розрахункову та експериментальну залежність функції перетворення від дії вологи на перетворювач.

Як видно з рис. 5, вихідна частота змінюється від 577,09 МГц до 576,22 МГц при зміні вологості від 0,1 % до 99,9 %.

Функція чутливості вологочутливого перетворювача визначається на основі виразу (30), при цьому вважається, що вихідна напруга перетворювача також залежить від вологості, як і порогова напруга вологочутливого польового транзистора. З врахування цих зауважень функцію перетворення вологочутливого перетворювача можна подати у вигляді

$$F_0(W) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{кан}^2(W) C^{-1}(W) [U_3 - U_{нор}(W)]^{-2}}{m_7 - U_{кан}^4(W) C^{-2}(W) [U_3 - U_{нор}(W)]^4 m_8} \right]^{1/2}, \quad (31)$$

де

$$m_7 = \frac{L_{кан}}{KU_{сб} t_2 Z \mu_n L}, \quad (32)$$

$$m_8 = \frac{L_{кан}^2}{K^2 U_{сб}^2 t_2^2 Z^2 \mu_n^2 R_g^2}, \quad (33)$$

Продиференціювавши функцію, описану виразом (31), за аргументом W , отримуємо параметричну функцію чутливості, яка має вигляд

$$S_n(W) = \frac{1}{4\pi} [U^2(W) C^{-1}(W) [U_1 - U_{ср}(W)]^2 m_7 - U^2(W) C^2(W) [U_1 - U_{ср}(W)]^4 m_8]^{-1/2} \times \\ \times \left[\left[2U_1(W) \frac{dU_1(W)}{dW} C^{-1}(W) [U_1 - U_{ср}(W)]^2 - \left(C^2(W) \frac{dC(W)}{dW} [U_1 - U_{ср}(W)]^2 + \right. \right. \right. \quad (34) \\ \left. \left. + 2[U_1 - U_{ср}(W)]^3 \frac{d(U_1 - U_{ср}(W))}{dW} C^{-1}(W) \right) U^2(W) \right] m_7 - \left[4U^2(W) \frac{dU_1(W)}{dW} C^2(W) [U_1 - U_{ср}(W)]^4 - \right. \\ \left. - \left(2C^3(W) \frac{dC(W)}{dW} [U_1 - U_{ср}(W)]^4 + 4[U_1 - U_{ср}(W)]^3 \frac{d(U_1 - U_{ср}(W))}{dW} C^2(W) \right) U^2(W) \right] m_8 \right]^{-1/2}$$

На рис. 6 подано розрахункові та експериментальні залежності функції чутливості від дії вологи на вологочутливий перетворювач

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість вологочутливого перетворювача змінювалась від 7,58 кГц/% до 9,18 кГц/% в діапазоні зміни вологості від 0,1% до 99,9%.

Експериментальні дослідження спектрів вихідного сигналу розроблених вологочутливих перетворювачів на основі МДН-структур з частотним виходом проведено за допомогою спектроаналізатора TyniSSA Ultra. На рис. 7 представлено спектр вологочутливого перетворювача з частотним вихідним сигналом, який побудовано на основі мікроелектронної транзисторної схеми з диференційним від'ємним опором, в якій вологочутливим елементом виступає МДН-конденсатор, частота

передачі дорівнює 525,42 МГц при вологості 50% та температурі 20°C.

На рис. 8 представлено спектр вологочутливого перетворювача на основі мікроелектронного автогенераторного приладу з використанням в якості первинного перетворювача вологості польового транзистора з індукованим каналом при вологості 50% та температурі 20°C, частота передачі складає 576,70 МГц.

Висновки

1. Досліджено основні параметри перетворювачів вологості з частотним виходом, конструкція яких базується на основі транзисторних схем з диференційним від'ємним опором. В якості первинних перетворювачів вологості виступають МДН-конденсатор і МДН-польовий транзистор. Конструкція приладу вимірювання вологості спрощена за рахунок використання первинних перетворювачів як пасивних, так і активних елементів автогенератора.

2. Розроблено математичні моделі приладів вимірювання вологості на основі принципу перетворення енергії постійного електричного поля в енергію змінного електричного поля, що дозволило отримати функції перетворення та чутливості приладів без використання складного методу розрахунку рівнянь Кірхгофа з нелінійних еквівалентних схем перетворювачів та їх розв'язку чисельними методами на сучасних комп'ютерах.

3. Показано, що основний внесок у зміну функцій перетворення і чутливості вносить зміна вологості, що викликає зміну еквівалентної ємності

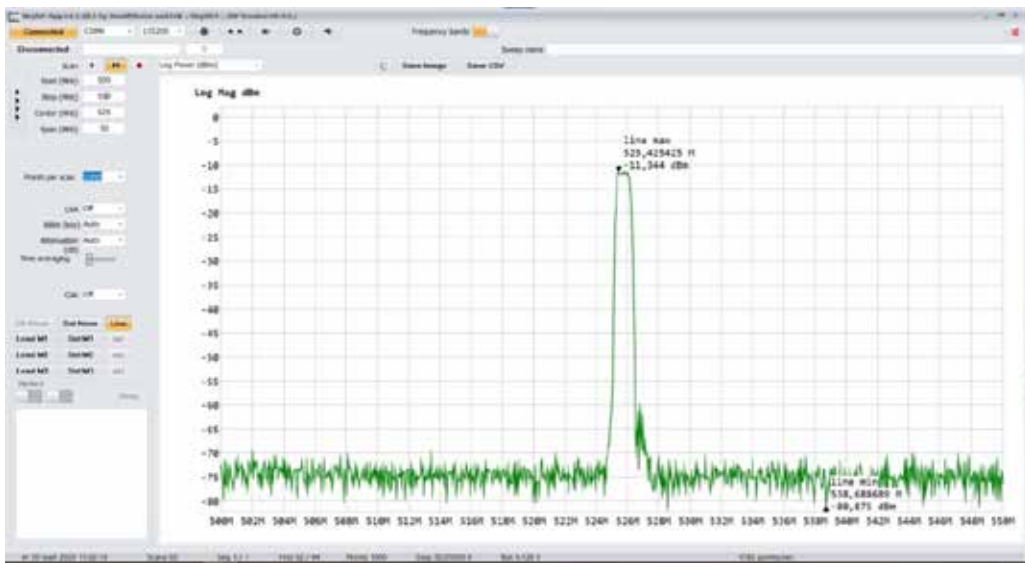


Рис. 7. Спектр вологочутливого перетворювача з частотним вихідним сигналом, який побудовано на основі мікроелектронної транзисторної схеми з диференційним від'ємним опором, в якій вологочутливим елементом виступає МДН-конденсатор при вологості 50% та температурі 20°C

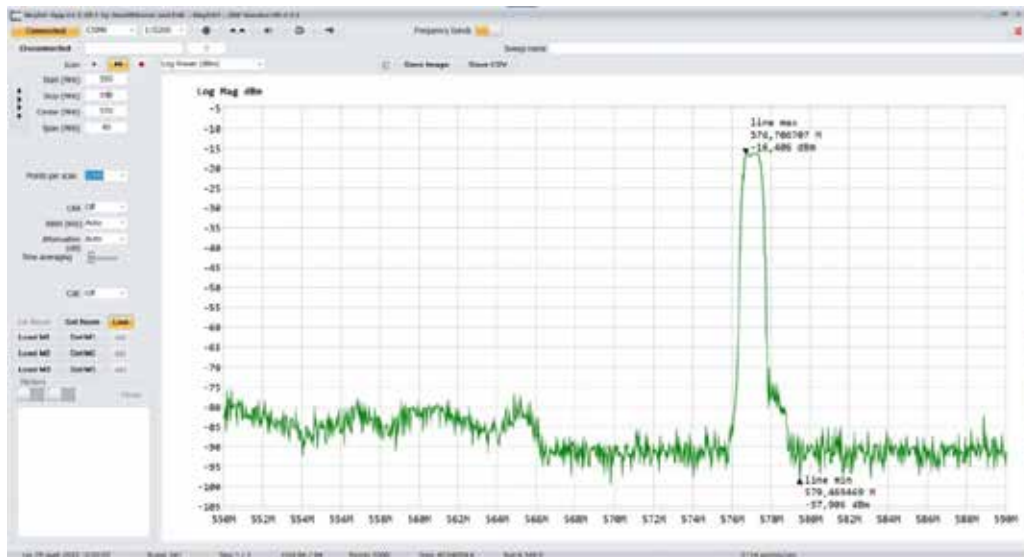


Рис. 8. Спектр вологочутливого перетворювача на основі мікроелектронного автогенераторного приладу з використанням в якості первинного перетворювача вологості польового транзистора з індукованим каналом при вологості 50% та температурі 20 °С

і диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту приладів. Чутливість вологочутливих перетворювачів змінюється від 6,75 кГц/% до 9,18 кГц/% в діапазоні зміни вологості від 0,1% до 99,9%.

4. Розраховані аналітичні вирази функцій перетворення і чутливості наочно демонструють вплив кожного елемента первинних перетво-

рювачів і елементів автогенераторів на вихідну частоту приладів. Вологочутливі прилади з частотним вихідним сигналом не потребують аналого-цифрових перетворювачів і підсилювальних пристроїв при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірвальну апаратуру. При роботі приладів у надвисоких частотах можлива передача інформації на відстань.

Список літератури:

1. Lei Hang, Wenquan Jin, Hyeon Sik Yoon, Yong Geun Hong and Do Hyeun Kim. Design and Implementation of a Sensor-Cloud Platform for Physical Sensor Management on CoT Environments // *Electronics*, 2018, 7, 140; P. 1–25. doi:10.3390/electronics7080140
2. Mao H., Tsuchida S., Terada T., Tsukamoto M. Estimating Scalp Moisture in a Hat Using Wearable Sensors // *Sensors*, 2023, 23(10), 4965. <https://doi.org/10.3390/s23104965>
3. Delipinar T., Shafique A., Gohar M.S., Yapici M.K. Fabrication and materials integration of flexible humidity sensors for emerging applications // *ACS Omega*, 2021, 6. P. 8744–8753.
4. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: в 3 т. / Вуйцік Вальдемар, Готра Зенон Юрійович, Григор'єв Віталій Вікторович, Каліта Владзімеж, Мельник Олег Миронович, Потенці Єжи; за ред. З. Ю. Готри; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка», Т. 1. 2002. 475 с.
5. Zhang X. et al. Printed Carbon Nanotubes-Based Flexible Resistive Humidity Sensor. // *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 20, No. 21, P. 12592–12601. doi: 10.1109/JSEN.2020.3002951.
6. Борисов О.В., Яганов П.О. Мікроелектронні сенсори на основі кремнієвих р-п переходів. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 174 с.
7. Невлюдов І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева. – Київ: НАУ, 2018. 200 с.
8. Chen L., Chang C., Chien L., Lee B., Shieh W. A Novel Packaging of the MEMS Gas Sensors Used for Harsh Outdoor and Human Exhale Sampling Applications // *Sensors*, 2023, 23(11):5087. <https://doi.org/10.3390/s23115087>
9. Damdam A.N., Ozay L.O., Ozcan C.K., Alzahrani A., Helabi R., Salama K.N. IoT-Enabled Electronic Nose System for Beef Quality Monitoring and Spoilage Detection // *Foods*, 2023, 12(11): 2227. <https://doi.org/10.3390/foods12112227>
10. Ambika Nagaraj. Introduction to Sensors in IoT and Cloud Computing Applications. Bangalore, India. 2021. 520 p.

11. Cloete Niel, Malekian Reza, Nai, Lakshmi. Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring // IEEE Access, 2016, 4. 1-1. 10.1109/ACCESS.2016.2592958.
12. Dei, Michele. Design of smart sensors for detection of physical quantities. Anno. 2010. 166 p.
13. V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylik, O. O. Seletska. Microelectronic humidity–frequency transducer with humidity-sensitive capacitive elements // Moldavian Journal of the Physical Sciences. Ghitu Institute of Electronic Engineering and Nanotechnologies. Chisinau, Moldova. 2017. Volume 16. No. 1-2. P. 94–100. <http://nano.asm.md/uploads/moldphys/2017/moldphys2017v16n12.pdf>
14. Osadchuk I.O., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Krylik L.V. Self-oscillating parametric humidity sensor with frequency output signal // Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. IAPGOS, 1/2023, 42–49 p. <http://doi.org/10.35784/iapgos.3476>
15. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Звягін О.С., Осадчук Я.О. Математична модель мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32(71), Ч. 2, № 1. 2021. С. 175–182.
16. Osadchuk A. V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of the Generator on the Basis of Transistor Structure with the Negative Differential Resistance // Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. Paper 33.
17. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O., Semenov A.O., Martyniuk V.V., Prytula M.O.. Investigation of a radio-frequency temperature transducer with a thermosensitive resistive element based on a complex compound of heterometallic β -diketonate // ICEMS-BIOMED-2022 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1254 (2022) 012027. doi:10.1088/1757-899X/1254/1/012027
18. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S. Frequency Transducers of Gas Concentration Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Sidorenko A., Hann H. (eds) Functional nanostructures and sensors for CBRN Defense and Environmental Safety and Security. NATO Space and Security Issues Series C: Environment. Springer, Dordrecht. March 18, 2020, pp. 161–184.
19. Osadchuk O.V., Krylik L.V., Osadchuk I.A. Mathematical model of parametric humidity transducer with frequency output // Applied Issues of Mathematical Modeling. 2020. Vol. 3. No. 2.1. P. 206–215.
20. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. Vinnitsa: “Universum-Vinnitsa”, 1999. 275 p.
21. Nalimova S., Shomakhov Z., Bobkov A., Moshnikov V. Sacrificial Doping as an Approach to Controlling the Energy Properties of Adsorption Sites in Gas-Sensitive ZnO Nanowires // Micro. 2023; 3(2):591-601. <https://doi.org/10.3390/micro3020040>
22. Turkani V.S., Maddipatla D., Narakathu B.B., Saeed T.S., Obare S.O., Bazuin B.J., Atashbar M.Z. A Highly Sensitive Printed Humidity Sensor Based on a Functionalized MWCNT/HEC Composite for Flexible Electronics Application // Nanoscale Adv. 2019, No. 1, P. 2311–2322.
23. Su P-G., Hsu C-C. Flexible Humidity Sensor Based on Au Nanoparticles/Organosilica-Containing Polyelectrolyte Composite // Chemosensors. 2023; 11(5):291. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11050291>
24. Liu H., Wang Q., Sheng W., Wang X., Zhang K., Du L., Zhou J. Humidity Sensors with Shielding Electrode Under Interdigitated Electrode // Sensors. 2019; 19(3): 659. <https://doi.org/10.3390/s19030659>
25. Tutov E.A., Bormontov E.N., Kashkarov V.M., Pavlenko M.N., Domashevskaya E.P. Influence of water vapor adsorption on the C-V characteristics of heterostructures containing porous silicon // Technical Physics. 2003. No. 1. P. 1442–1448.
26. Osadchuk A., Osadchuk V., Seletska O., Krylik L. Microelectronic Transducer Gas Concentration based on MOSFET with Active Inductive Element // Przegląd Elektrotechniczny, R. 95 No 4/2019. P. 237–241.
27. Sze S.M., Kwok K.Ng. Physics of Semiconductor Devices. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. 763 p.

Osadchuk I.O., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S. HUMIDITY SENSITIVE TRANSDUCERS BASED ON MOS STRUCTURES WITH FREQUENCY OUTPUT

The main parameters of humidity transducers with frequency output, the design of which is built on the basis of transistor structures with differential negative resistance, were studied. The MOS capacitor and the MOS field-effect transistor act as primary humidity transducers. The scheme of the humidity measuring device is simplified due to the use of primary transducers of both passive and active elements of the self-oscillator.

Based on the principle of converting the energy of a constant electric field into the energy of an alternating electric field, mathematical models of humidity measuring devices were developed, which made it possible to obtain the conversion functions and sensitivity of the devices without using the complex method of calculating Kirchhoff equations from equivalent circuits of transducers and solving them on modern computers.

The main contribution to the change in the conversion function and sensitivity is made by the change in humidity, which changes the equivalent capacity and differential negative resistance in the oscillating circuit of the self-oscillator, which, accordingly, changes the output frequency of the measuring devices. The sensitivity of humidity-sensitive transducers varies from 6.75 kHz/% to 9.18 kHz/% in the range of humidity changes from 0.1% to 99.9%.

The calculated analytical expressions of the parametric conversion and sensitivity functions demonstrate the influence of the elements of the primary measuring transducers and the elements of self-oscillator parametric transducers on the output frequency of the devices. Humidity-sensitive transducers with a frequency output signal do not require analog-to-digital transducers and amplifiers for further processing of output information signals, which significantly reduces the cost of information-measuring devices and systems.

Key words: *humidity, transducer, frequency, self-oscillator, MOS-structure.*