

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

DOI 10.31891/2307-5732-2021-297-3-124-130

УДК 621.382

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

Вінницький національний технічний університет

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЮ
З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ**

Розроблено пристрій для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом HR202. На основі математичного моделювання електричних характеристик розробки отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. Експериментально встановлено, що збільшення температури навколишнього середовища при діапазоні відносної вологості $W=30\div 85\%$ приводить до розширення діапазону генерації автогенераторного перетворювача вологості і до збільшення чутливості пристрою до вимірюваної величини – відносної вологості. Діапазон генерації автогенераторного перетворювача вологості при температурі $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ набуває значення 823 кГц (середнє значення чутливості – 16,18 кГц/%), а при температурі $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 1323 кГц (середнє значення чутливості – 29,10 кГц/%). Для підтвердження теоретичних результатів схемотехнічного рішення розробленого пристрою проведено комп'ютерне моделювання в середовищі LTSpice. Результати математичного моделювання відповідають експериментальним даним.

Ключові слова: пристрій для вимірювання вологості, частотний перетворювач, вологочутливий резистивний елемент, функція перетворення, рівняння чутливості.

A. V. OSADCHUK, L. V. KRYLIK, I. A. OSADCHUK, O. S. ZVIAHIN

Vinnytsia National Technical University

**MATHEMATICAL SIMULATION OF A DEVICE WITH FREQUENCY OUTPUT
FOR MEASUREMENT OF HUMIDITY**

The device for measuring humidity with a moisture-sensitive resistive element HR202 has been developed. The self-generating transducer is designed as a hybrid integrated circuit based on a bipolar transistor VT1 and a field-effect two-gate transistor VT2. The negative differential resistance, which is formed by the parallel connection of the impedance with a capacitive component at the collector electrodes of the bipolar transistor VT1, the drain of the field-effect transistor VT2 and inductance L1, leads to the occurrence of electrical oscillations in the circuit. When exposed to moisture on the sensitive resistive element R_W , the capacitive component of the impedance at the electrodes of the transistor structure changes, which causes an effective change in the frequency of the oscillatory circuit. On the basis of mathematical modeling of electrical characteristics, analytical expressions for the transformation function and the sensitivity equation are obtained. It has been experimentally established that an increase in the ambient temperature in the range of relative humidity $W = 30 \div 85\%$ leads to an expansion of the generation range of the autogenerating humidity transducer, as well as to an increase in the sensitivity of the device to the measured value. The generation range of the autogenerating humidity transducer at a temperature of $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ acquires a value of 823 kHz (the average value of the sensitivity is 16.18 kHz / %), and at a temperature of $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 1323 kHz (the average value of the sensitivity is 29.10 kHz / %).

To confirm the theoretical results of circuit solutions developed device in the computer modeling of LTSpice modeling environment. The studies were carried out at different temperatures (20°C, 30°C, 40°C, 50°C) in the range of change in the resistance of the moisture-sensitive resistive element from 1750 kOhm to 2.1 kOhm, which corresponds to an increase in the value of the relative air humidity from 30 % to 90 %.

The results of theoretical and experimental studies have shown that at the output there are periodic oscillations device for measuring the humidity rate which increases with increasing values of relative humidity. The obtained theoretical and experimental studies are in good agreement, the relative error does not exceed 2.5 %.

Keywords: device for measuring humidity, frequency transducer, humidity-sensitive resistive element, conversion function, sensitivity equation.

Постановка проблеми

Важливою різновидністю вимірювальних перетворювачів є сенсори вологості. В Україні вимірювання вологості є одним із поширених напрямків вимірювань фізичних величин. Тому досить важливим завданням сучасного приладобудування та контрольно-вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання вологості для різних виробництв, створення вимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, які супроводжують вимірювальний процес [1–4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розробкою та створенням первинних перетворювачів вологості на сьогоднішній день займаються провідні спеціалісти світу, тому що вимірювання вологості в газовій суміші (повітрі) суттєво впливає на якість проведення технологічних процесів як в технології мікроелектроніки, так і в різноманітних галузях промисловості. Нині розроблено різноманітні варіанти сенсорів для контролю мікрОВОЛОГОСТІ газоподібних та рідких середовищ і відносної вологості в промислових приміщеннях. Принцип дії таких сенсорів базується на зміні електрофізичних параметрів (провідності, діелектричної проникності) вологочутливої плівки при фізичній сорбції пари води із навколишнього середовища [5].

Однак, незалежно від конструктивного виконання первинних перетворювачів їх метрологічні характеристики (поріг чутливості, точність, діапазон вимірювань, постійна часу тощо) визначаються насамперед фізико-хімічними і адсорбційними властивостями використаного сорбенту, які залежать від технології формування плівки сорбенту.

Велике різноманіття технологічних процесів, що існують в промисловості та наукових дослідженнях, вимагають високоточного контролю відносної вологості середовища. Перспективним науковим напрямком в цій сфері є створення частотних пристроїв вимірювання вологості на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором, в розвиток теорії якого значний здобуток внесли вітчизняні та закордонні вчені. Саме використання частотного принципу перетворення «вологість-частота» в поєднанні з технологією мікроелектроніки сприяє підвищенню метрологічних та економічних показників перетворювачів вологості, виготовлених у вигляді гібридних інтегральних схем [6, 7].

Отже, розробка та практичне застосування таких пристроїв є актуальною задачею.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Встановлено, що технічний рівень сенсорних систем вологості залежить насамперед від технічних розробок перетворювача, а саме його чутливих елементів, конструктивного рішення, принципу дії та технології виготовлення [8–14]. Це мотивує для реалізації подальших досліджень.

Метою дослідження є розробка пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором (рис. 1). Експериментальним зразком слугував вологочутливий резистивний елемент HR202.

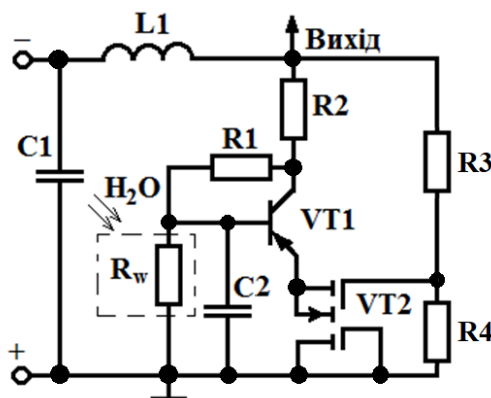


Рис. 1. Електрична схема пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості

Автогенераторний перетворювач розроблено у вигляді гібридної інтегральної схеми на основі біполярного транзистора VT1 та польового двозатворного транзистора VT2. Від'ємний диференціальний опір, який утворений паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою на електродах колектор біполярного транзистора VT1, стік польового транзистора VT2 та індуктивності L1, приводить до виникнення електричних коливань в контурі. Два резистори R1, R2 та вологочутливий резистивний елемент R_W утворюють дільник напруги для живлення біполярного транзистора та створення позитивного зворотного зв'язку, а резистори R3 та R4 – для керування польового транзистора VT2. Крім того, електричне живлення біполярного VT1 та польового VT2 транзисторів залежить від величини зміни опору вологочутливого резистивного елемента R_W зі зміною вологості досліджуваного середовища. Проходженню змінного струму через джерело постійної напруги запобігає обмежувальний конденсатор C1. При дії вологи на вологочутливий резистивний елемент R_W змінюється ємнісна складова повного опору на електродах транзисторної структури, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру. Схема мікроелектронного частотного пристрою вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом HR202 (рис. 1) була зібрана на біполярному транзисторі BC857C та польовому двозатворному транзисторі BF998. Режим транзисторів VT1 і VT2 по постійному струму був таким: струм у ланцюзі колектора транзистора VT2 дорівнює 3,55 мА, а напруга на колекторі – 5 В. Опори схеми мають такі значення $R_1=2,2$ кОм; $R_2=10$ Ом; $R_3=8,2$ кОм; $R_4=5,6$ кОм. Індуктивність автогенератора складає 100 мкГн. Цьому режиму, при вологості 30 %, відповідала частота генерації 1176,470 кГц. Описана схема генератора дозволяє одержати вихідну напругу до 45 В у широкому діапазоні частот. Нестабільність частоти дорівнює $1,87 \cdot 10^{-4}$ Гц.

Без знання параметрів перетворювачів вологості неможливо їх створити, тому задача полягала в розробці математичної моделі, на основі рішення якої будуть визначені функція перетворення та рівняння чутливості. На основі електричної схеми пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості (рис. 1), по колу позитивного зворотного зв'язку визначено рівняння, на основі якого отримано аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{\pi \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5}}{4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb}}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{де } K_1 &= 4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{eb}^2, \quad K_2 = -4 \cdot \pi^2 \cdot L_1^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{cb}^2 - 8 \cdot \pi^2 \cdot L_1^2 \cdot C_{eb} \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{ds}, \\ K_3 &= -4 \cdot \pi^2 \cdot L_1^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + L_1 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{cb}, \quad K_4 = 2 \cdot L_1 \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} + L_1 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}, \\ K_5 &= 4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2. \end{aligned}$$

Позначення, які використовувались в аналітичних виразах, а саме: $R_W(W)$ – вологочутливий резистивний елемент; L_1 – індуктивність коливального контуру; C_{eb} – ємність р-п-переходу емітер-база; C_{cb} – ємність р-п-переходу колектор-база; C_{ds} – ємність «стік-витік».

На основі виразу (1) теоретично розраховано та експериментально досліджено функції перетворення пристрою для вимірювання вологості. Експериментальні дослідження проводились при різних значеннях температури навколишнього середовища (рис. 2).

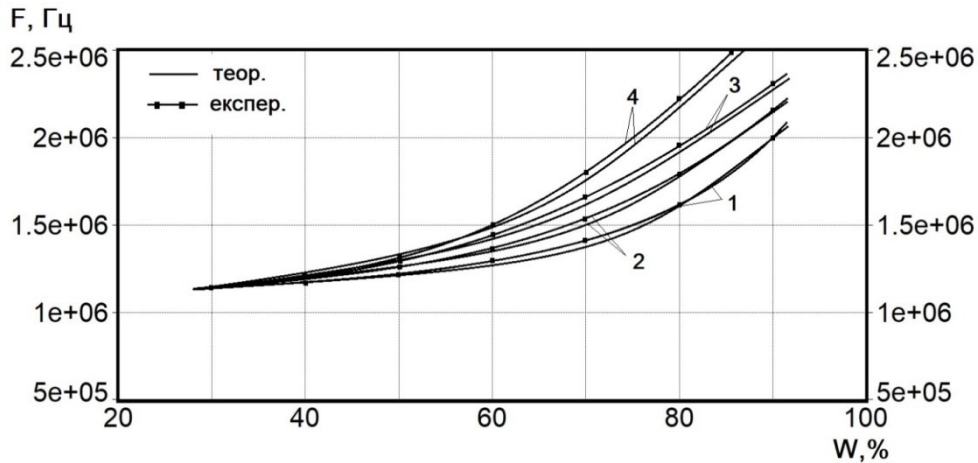


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації від зміни відносної вологості повітря пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом:
1) $T = 20^\circ\text{C}$; 2) $T = 30^\circ\text{C}$; 3) $T = 40^\circ\text{C}$; 4) $T = 50^\circ\text{C}$

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що збільшення температури навколишнього середовища при діапазоні відносної вологості $W = 30 \div 85\%$ приводить до розширення діапазону генерації автогенераторного перетворювача вологості, що в свою чергу збільшує чутливість перетворювача при збільшенні температури навколишнього середовища. Таким чином, результати досліджень показали:

- 823 кГц ($T = 20^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- 1026 кГц ($T = 30^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- 1194 кГц ($T = 40^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- 1323 кГц ($T = 50^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$).

На основі рівняння (1) визначено аналітичний вираз рівняння чутливості (2) розробленого пристрою:

$$\begin{aligned} S_W^F &= \frac{\pi \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) \pm \frac{M_1 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) + M_2 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) + M_3 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right)}{\sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5}} - \\ &\quad \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb}}{\pi \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5} \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right)}, \quad (2) \\ &\quad \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb}}{\pi \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5} \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right)}, \end{aligned}$$

де $M_1 = \pi^2 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2$, $M_2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{eb}^2$, $M_3 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2$.

Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості та температури досліджуваного середовища розробленого пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом подано на рис. 3. З нього видно, що збільшення температури навколишнього середовища при діапазоні відносної вологості $W = 30 \div 85\%$ призводить до збільшення чутливості. Середні значення чутливості за різних температур навколишнього середовища наведено нижче:

- від 5,02 кГц/% до 21,2 кГц/% ($T = 20^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- від 5,7 кГц/% до 24,9 кГц/% ($T = 30^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- від 7,2 кГц/% до 28,05 кГц/% ($T = 40^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- від 8,3 кГц/% до 37,4 кГц/% ($T = 50^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$).

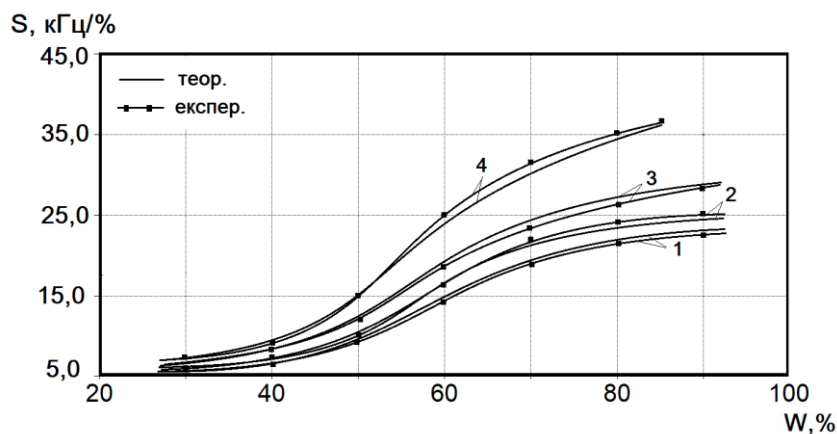


Рис. 3. Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом:
1) $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2) $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3) $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4) $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для підтвердження теоретичних результатів та проведення експериментальних досліджень електричне коло мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом (рис. 1) було досліджене в середовищі схемотехнічного моделювання *LTSpice XVII* [15]. Дослідження проводились при різних температурах ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) в діапазоні зміни опору вологочутливого резистивного елемента від $R_W(W)=1750\text{ кОм}$ до $R_W(W)=2,1\text{ кОм}$, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 30% до 90% .

Так на рис. 4 наведено експериментальну залежність струму індуктивності від часу при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та 35% , 60% , 90% вологості.

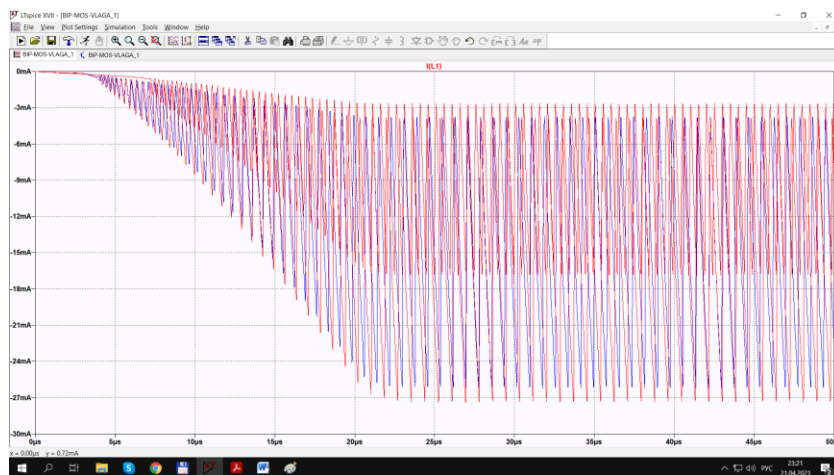


Рис. 4. Залежність струму індуктивності від часу при різних значеннях опору вологочутливого резистивного елемента в *LTSpice* при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вологості – 35% ; 60% ; 90%

На рис. 5 наведено промодельовану вихідну змінна напруга мікроелектронного частотного перетворювача вологості при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносній вологості 35% , 60% , 90% . Вихідна частота перетворювача при 35% складає $1176,47\text{ кГц}$, при 60% складає $1265,822\text{ кГц}$, а при 90% відносної вологості складає $2000,00\text{ кГц}$.

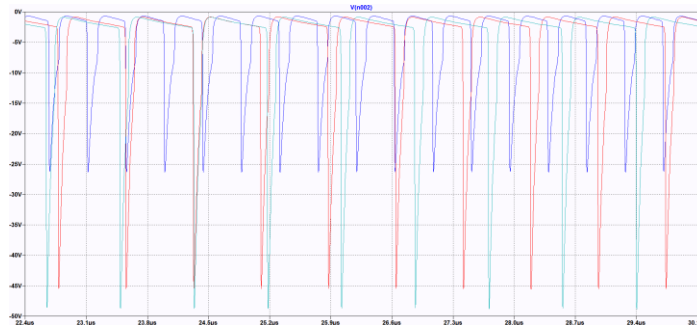


Рис. 5. Залежність вихідної змінної напруги в часі при різних значеннях опору вологочутливого резистивного елемента в *LTSpice* при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вологості – 35% ; 60% ; 90%

На рис. 6 наведено промодельована вихідна змінна напруга мікроелектронного частотного перетворювача вологості при температурі 50 °C та відносній вологості 35 %, 60 %, 85 %. Вихідна частота перетворювача при 35 % складає 1204,819 кГц, при 60 % складає 1408,45 кГц, а при 85 % відносної вологості складає 2500,00 кГц.

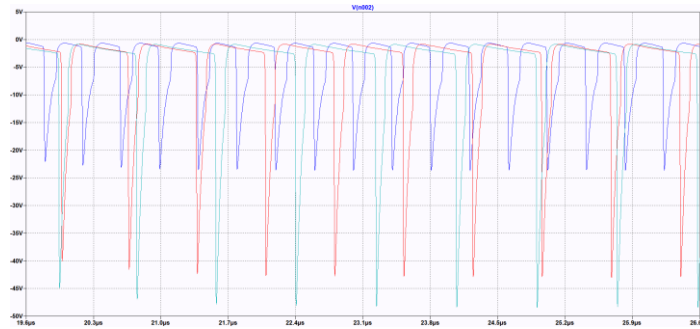


Рис. 6. Залежність вихідної змінної напруги в часі при різних значеннях опору вологочутливого резистивного елемента в LTSpice при 50 °C та вологості – 35 %; 60 %; 85 %

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень легко бачити, що на виході мікроелектронного частотного перетворювача вологості дійсно будуть існувати періодичні коливання частота яких буде збільшуватись зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Порівнявши отримані теоретичні та експериментальні значення частоти вихідного сигналу було встановлено, що відносна похибка не перевищує 2,5 %.

Висновки

Розроблено пристрій з частотним виходом для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом HR202. Доведено, що електричні характеристики сенсорних систем вологості залежать як від конструктивних рішень пристрою для вимірювання вологості, так і від конструктивних та технологічних особливостей чутливого елемента. Проведено математичне моделювання пристрою, на основі якого визначено аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Експериментально встановлено, що збільшення температури навколишнього середовища при діапазоні відносної вологості $W = 30 \div 85$ % приводить до розширення діапазону генерації автогенераторного перетворювача вологості і до збільшення чутливості пристрою до вимірюваної величини – відносної вологості. Діапазон генерації автогенераторного перетворювача вологості при температурі $T = 20$ °C набуває значення 823 кГц (середнє значення чутливості – 16,18 кГц/%), а при температурі $T = 50$ °C – 1323 кГц (середнє значення чутливості – 29,10 кГц/%). Для підтвердження теоретичних результатів схемотехнічне рішення розробленого пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості досліджено в середовищі моделювання LTSpice. Дослідження проводились при різних температурах (20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C) в діапазоні зміни опору вологочутливого резистивного елемента від $R_W(W) = 1750$ кОм до $R_W(W) = 2,1$ кОм, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 30 % до 90 %.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень показали, що на виході пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості існують періодичні коливання, частота яких збільшується зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 2,5 %.

Література

1. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
2. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
3. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes [Electronic resource] / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical. – 30 March 2006. – Vol. 114, – № 1. – P. 254–262. – Mode of access : https://biomems.me/columbia.edu/research/PDFs/jour/Bozhi_06_Compliant_Low-Cost_Humidity_Nanosensor.pdf (date of access 10.05.2021).
4. 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 [Electronic resource] / 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. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/305522000_Design_and_Development_for_Capacitive_Humidity_Sensor_Applications_of_Lead-Free_CaMgFeTi-Oxides-Based_Electro-Ceramics_with_Improved_Sensing_Properties_via_Physisorption (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
5. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review [Electronic resource] / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // Sensors. –

2014. – № 14. – P. 7881–7939. DOI:10.3390/s140507881. – Mode of access : https://www.researchgate.net/publication/262015128_Humidity_Sensors_Principle_Mechanism_and_Fabrication_Technologies_A_Comprehensive_Review/link/00b495368b08331ae9000000/download (date of access 10.05.2021)
6. https://www.researchgate.net/publication/262015128_Humidity_Sensors_Principle_Mechanism_and_Fabrication_Technologies_A_Comprehensive_Review/link/00b495368b08331ae9000000/download (date of access 10.05.2021).
7. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor [Electronic resource] / 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. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/224088790_CMOS-MEMS_capacitive_humidity_sensor (date of access 10.05.2021).
8. Осадчук В. С. Сенсори вологості : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2003. – 208 с.
9. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 275 с.
10. 9. Osadchuk A.V. Optical transducers with frequency output / A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov // Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017). – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10445/104451X/Optical-transducers-with-frequency-output/10.1117/12.2280892.full?SSO=1> (date of access 10.05.2021).
11. Osadchuk A.V. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors / A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletska, P. Kisała, K. Nurseitova // Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019). – Mode of access : <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11176/111761I/Theory-of-photoreactive-effect-in-bipolar-and-MOSFET-transistors/10.1117/12.2538264.full> (date of access 10.05.2021).
12. Osadchuk A. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element / A. Osadchuk, V. Osadchuk, O. Seletska, L. Krylik // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95. Warszawa, Poland. – 2019. – NR 4. – P. 237–241. – ISSN 0033-2097, doi:10.15199/48.2019.04.45. – Mode of access : <http://pe.org.pl/articles/2019/4/45.pdf> (date of access 10.05.2021).
13. Осадчук О. В. Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, Я. О. Осадчук // Прикладні питання математичного моделювання. – 2020. – Т. 3, № 2.1. – С. 206–215. – Режим доступу : https://mkmm.org.ua/archive_mkmm/%D0%9F%D0%9F%D0%9C%D0%9C%20%D0%A2.3%20%E2%84%962%20%D0%A7.1.pdf (дата звернення 10.05.2021).
14. Осадчук О. В. Математична модель мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. О. Селецька // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 5(277). – С. 195–198. – Режим доступу : <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/277-2019-5-t.pdf> (дата звернення 10.05.2021).
15. Осадчук О.В. The radiomeasuring humidity sensor with the frequency output signal / О. В. Осадчук, О. С. Звягін, А. Ю. Савицький, С. В. Барабан, О. О. Селецька // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 6. – С. 216–218. – Режим доступу : [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_6/\(243\)%202016-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_6/(243)%202016-6-t.pdf) (дата звернення: 10.05.2021).
16. Володин В. Я. LTspice : компьютерное моделирование электронных схем / В. Я. Володин. – СПб : БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.

References

1. Datchiki : справочное пособие / pod obsh. red. V. M. Sharapova, E. S. Polishuka. – Moskva : Tehnosfera, 2012. – 624 s.
2. Dzhekson R. G. Novejschie datchiki / R. G. Dzhekson. – Moskva : Tehnosfera, 2007. – 384 s.
3. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes [Electronic resource] / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical. – 30 March 2006. – Vol. 114, – № 1. – P. 254–262. – Mode of access: https://biomems.me.columbia.edu/research/PDFs/jour/Bozhi_06_Compliant_Low-Cost_Humidity_Nanosensor.pdf (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
4. 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 [Electronic resource] / 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. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/305522000_Design_and_Development_for_Capacitive_Humidity_Sensor_Applications_of_Lead-Free_CaMgFeTi-Oxides-Based_Electro-Ceramics_with_Improved_Sensing_Properties_via_Physisorption (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
5. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review [Electronic resource] / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // Sensors. – 2014. – № 14. – P. 7881 – 7939. doi:10.3390/s140507881. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/262015128_Humidity_Sensors_Principle_Mechanism_and_Fabrication_Technologies_A_Comprehensive_Review/link/00b495368b08331ae9000000/download (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
6. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor [Electronic resource] / 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. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/224088790_CMOS-MEMS_capacitive_humidity_sensor (date of access 10.05.2021). – Title from screen.

7. Osadchuk V. S. Sensory volohosti : monohrafiia / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk. – Vinnytsia : UNIVERSUM – Vinnytsia, 2003. – 208 s.
8. Osadchuk V. S. Reaktyvni vlastyvoli tranzystoriv i tranzystornykh skhem : monohrafiia / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk. – Vinnytsia : UNIVERSUM – Vinnytsia, 1999. – 275 s.
9. Osadchuk A.V. Optical transducers with frequency output / A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, Maksat Kolimoldayev, Pawel Komada, Kanat Mussabekov // Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017). – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10445/104451X/Optical-transducers-with-frequency-output/10.1117/12.2280892.full?SSO=1> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
10. Osadchuk A.V. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors / A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletska, P. Kisala, K. Nurseitova // Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019). – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11176/111761I/Theory-of-photoreactive-effect-in-bipolar-and-MOSFET-transistors/10.1117/12.2538264.full> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
11. Osadchuk A. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element» / A. Osadchuk, V. Osadchuk, O. Seletska, L. Krylik // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95. Warszawa, Poland. – 2019. – NR 4. – P. 237 – 241. ISSN 0033-2097, doi:10.15199/48.2019.04.45. – Mode of access: <http://pe.org.pl/articles/2019/4/45.pdf> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
12. Osadchuk O. V. Matematychna model parametrychnoho peretvoriuvacha volohosti z chastotnym vykhodom / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, Ya. O. Osadchuk // Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia. – 2020. – T. 3, № 2.1. – S. 206–215. – Rezhym dostupu: https://mkmm.org.ua/archive_mkmm/%D0%9F%D0%9F%D0%9C%D0%9C%20%D0%A2.3%20%E2%84%96%20%D0%A7.1.pdf (data zvernennia 10.05.2021). – Nazva z ekrana.
13. Osadchuk O. V. Matematychna model mikroelektronnoho vymiriuvacha volohosti z chastotnym vykhodom / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, O. O. Seletska // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2019. – № 5(277). – S. 195–198. – Rezhym dostupu: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/277-2019-5-t.pdf> (data zvernennia 10.05.2021). – Nazva z ekrana.
14. Osadchuk O.V. The radiomeasuring humidity sensor with the frequency output signal / O. V. Osadchuk, O. S. Zviahin, A. Yu. Savytskyi, S. V. Baraban, O. O. Seletska // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2016. – №6. – S. 216–218. – Rezhym dostupu: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_6/\(243\)%202016-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_6/(243)%202016-6-t.pdf) (data zvernennia 10.05.2021). – Nazva z ekrana.
15. Volodin V. Ya. LTSpice : kompyuternoe modelirovanie elektronnykh shem / V. Ya. Volodin. – SPb. : BHV-Peterburg, 2010. – 400 s.

O. B. ОСАДЧУК
Л. В. КРИЛИК
Я. О. ОСАДЧУК
О. С. ЗВЯГІН

ORCID ID: 0000-0001-6662-9141
ORCID ID: 0000-0002-5472-0797

osadchuk.av69@gmail.com
lyudmila.krylik@gmail.com
osadchuk.j93@gmail.com
zviahin86@gmail.com

Рецензія/Peer review : 11.05.2021 р.

Надрукована/Printed : 30.06.2021 р.