

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ВИМІРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Розроблено мікроелектронний вимірювач вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202. Виконано математичне моделювання характеристик розробленого вимірювача вологості, в тому числі отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. Досліджено вплив температури на характеристики мікроелектронного вимірювача вологості, в результаті чого встановлено, що зі зростанням температури діапазон відносної вологості та частота генерації розробленого мікроелектронного вимірювача вологості зменшується. Зокрема, найбільшу чутливість вимірювач вологості має при температурі 20 °С, а середнє значення чутливості при температурі 20 °С в діапазоні вимірювання відносної вологості 20÷95% дорівнює 45 кГц/%. Результати моделювання підтверджено отриманими експериментальними даними.

Ключові слова: вимірювач вологості, вологочутливий резистор, функція перетворення, рівняння чутливості.

A. V. OSADCHUK, L. V. KRYLIK, O. O. SELETSKA

Vinnitsia National Technical University

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE MICROELECTRONIC MEASUREMENT DEVICE OF HUMIDITY WITH A FREQUENCY OUTPUT SIGNAL

A microelectronic humidity meter with a frequency output signal that includes humidity-sensitive resistor HR202 has been developed. The self-oscillating meter is developed using a transistor structure with negative resistance based on field-effect double-gate and bipolar transistors. Negative differential resistance, which is formed by parallel connection of the inductance and the impedance with a capacitive component on the electrodes of the emitter and collector of the bipolar transistor, causes the occurrence of electrical oscillations in the circuit. The voltage divider is formed by two resistors, one of which is moisture-sensitive. In addition, the electric power supply of field-effect and bipolar transistors depends on the magnitude of the variation of the resistance in the moisture-sensitive resistor with a changing of the humidity in the studied environment. The protective capacitor prevents the flowing of AC through a direct voltage source. Consequently, at the moisture-sensitive resistor, the capacitive component of the impedance of the electrodes emitter and collector of the bipolar transistor is changing, that results to an effective change in the frequency of the oscillatory circuit. Mathematical simulation of the measuring device is carried out, that enabled to obtain the analytical expressions of the transfer function and the sensitivity equation. It has been experimentally and theoretically determined that the range of relative humidity and the generation frequency of the developed microelectronic humidity meter decreases, with increasing temperature. The developed humidity meter has the highest sensitivity at a temperature of 20 °C. The average sensitivity at a temperature of 20 °C within the range of measuring relative humidity of 20 ÷ 95% is 45 kHz /%.

Keywords: meter of humidity, humidity sensitive resistor, transfer function, equation of sensitivity.

Вступ

Відомо, що вологість відіграє істотну роль у кожній частині Землі в біології та автоматизованих виробничих процесах. Для того, щоб мати бажану атмосферу навколишнього середовища, необхідно контролювати, визначати та регулювати вологість навколишнього середовища в різних умовах, при зміні значень температури від низьких до високих, або в сумішах з іншими газами, за допомогою точних та непрямих сенсорів. Насправді необхідність захисту навколишнього середовища призвела до розширення різноманітності розробок сенсорів вологості на основі використання фізико-хімічних методів за наявності органічних, неорганічних або гібридних матеріалів. Прогрес сенсорних систем вологості включає в себе значні зусилля щодо покращення розробок перетворювача, зокрема його чутливих елементів, конструктивного рішення, принципу дії та технології виготовлення [1–6]. У зв'язку з цим ключовими характеристиками для досягнення потрібної величини ефективності, оптимізації поверхні, простоти процесу виробництва та інвестиційних витрат є матеріали перетворювача, а також наявність відповідних технологій виробництва, вільний вибір геометричних властивостей приладу.

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, в яких вологість перетворюється у частоту, дозволяє значно підвищити чутливість та точність вимірювання, спростити схеми подальшої обробки інформації. А застосування принципу перетворення «вологість – частота» на основі транзисторних структур з від'ємним опором, дає змогу виключити використання АЦП при обробці сигналів, що знижує собівартість систем контролю та управління, дозволяє підвищити не тільки чутливість, а й точність перетворення інформативного сигналу – відносної вологості навколишнього середовища в частоту [7–10].

Отже, розробка та впровадження їх в практику на тепер є актуальною задачею.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Метою дослідження є розробка нового мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором на основі органічного полімеру (рис. 1) [11], а також вплив нового схемотехнічного рішення та температури досліджуваного середовища на чутливість до вимірювального параметра та діапазон вимірювання відносної вологості.

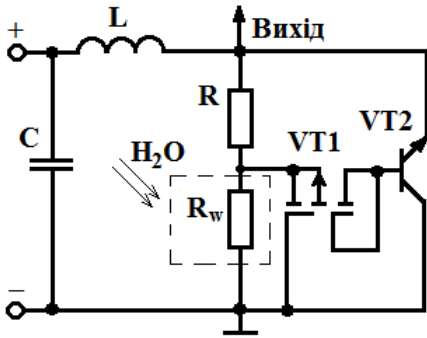


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом

Автогенераторний вимірювач розроблено на основі транзисторної структури з від’ємним опором на основі польового двозатворного транзистора VT1 та біполярного транзистора VT2. Від’ємний диференціальний опір, який утворений паралельним включенням повного опору з емісною складовою на електродах емітер та колектор біполярного транзистора VT2 та індуктивності L, приводить до виникнення електричних коливань в контурі. Дільник напруги утворюють два резистора, один з яких вологочутливий RW. Крім того, електричне живлення польового VT1 та біполярного транзисторів VT2 залежить від величини зміни опору вологочутливого резистора RW зі зміною вологості досліджуваного середовища. Обмежувальний конденсатор C запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги. При наступній дії вологи на

вологочутливий резистор RW змінюється емісна складова повного опору на електродах емітер та колектор біполярного транзистора VT2, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

Експериментальним зразком слугував вологочутливий резистор HR202 на основі органічного полімеру. Дослідження і вивчення полімерних сенсорів вологості тривали протягом останніх чотирьох десятиліть та використовувались в промисловості. Більшість з цих сенсорів розроблялись на основі тонких плівок пористих полімерів [2] та застосовують принципи реєстрації, подібні до принципів сенсорів на основі металооксидних керамічних сенсорів. Робота сенсорів ґрунтується на фізичному та хімічному поглинанні води плівками та конденсації в присутності капілярних пор, а отже, і зміні деяких фізичних та електричних властивостей перетворювача. Величина зміни об’ємної провідності або діелектричної проникності залежить від внутрішніх властивостей.

На основі електричної схеми мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом (рис. 1) з вологочутливим резистором HR202, використовуючи метод Ляпунова [12], по колу позитивного зворотного зв’язку отримано рівняння, на основі якого визначено аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{\pi \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2 + H_1 - H_2 + H_3 + H_4 + H_5}}{4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}}, \quad (1)$$

де $H_1 = 4 \cdot \pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot L \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2$;

$H_2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2$;

$H_3 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}^2$;

$H_4 = L \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2 + L \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}$;

$H_5 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}$.

У вище наведених аналітичних виразах використовувались такі позначення: RW(W) – вологочутливий резистор; L – індуктивність коливального контура; C_{eb} – ємність р-п-переходу емітер-база; C_{ds} – ємність стік-витік; C_{gs} – ємність затвор-витік.

Використовуючи вираз (1) теоретично розраховано та експериментально досліджено функції перетворення розробленого мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202 для різних значень температур досліджуваного середовища (рис. 2).

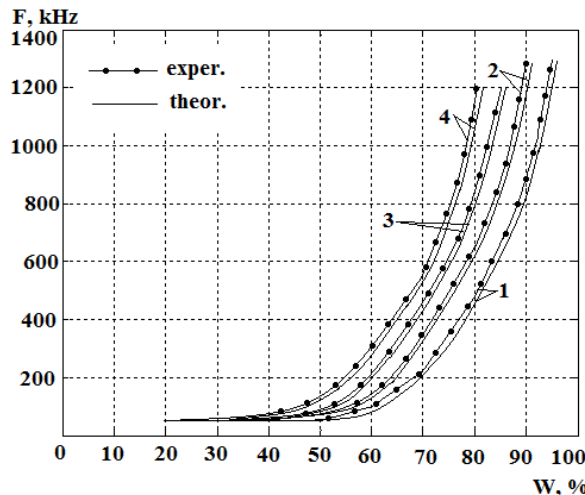


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації від зміни відносної вологості повітря мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202: 1 – T=20 °C; 2 – T=30 °C; 3 – T=40 °C; 4 – T=50 °C

З рис. 2 видно, що температура суттєво впливає на діапазон відносної вологості досліджуваного середовища. Із зростанням температури діапазон відносної вологості досліджуваного середовища та частота генерації розробленого мікроелектронного вимірювача вологості зменшується. Діапазони зміни частоти генерації розробленого мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом (рис. 1) та відносної вологості досліджуваного середовища набувають таких значень:

- 1250 кГц ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 20 \div 95\%$);
- 1250 кГц ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 20 \div 90\%$);
- 1150 кГц ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 20 \div 85\%$);
- 1150 кГц ($T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 20 \div 80\%$).

Аналітичний вираз рівняння чутливості (2) нового схемотехнічного рішення визначено на основі рівняння (1):

$$S_W^F = \frac{\pi \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2} \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) \pm \frac{D_1 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) + D_2 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) + D_3 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) + D_4 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right)}{\sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2 + H_1 - H_2 + H_3 + H_4 + H_5}} - \frac{\pi \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2 + H_1 - H_2 + H_3 + H_4 + H_5} \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right)}{4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}}, \quad (2)$$

де $D_1 = \pi^2 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2$; $D_2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2$;
 $D_3 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}^2$; $D_4 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}$.

На рис. 3 подано експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості та температури досліджуваного середовища розробленого мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202.

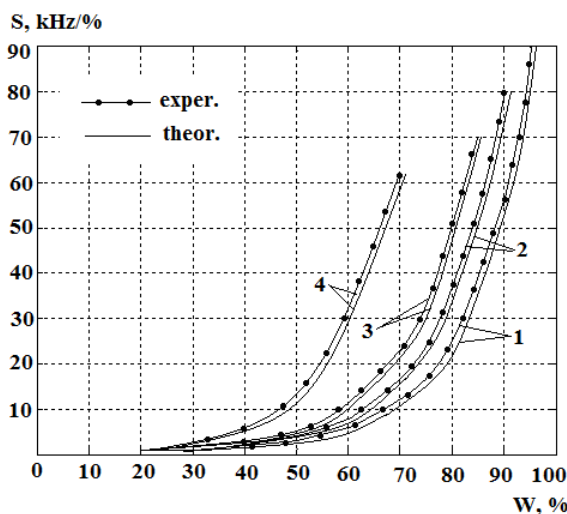


Рис. 3. Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202: 1 – $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$

З рис. 3 видно, що чутливість розробленого вимірювача вологості з вологочутливим резистором HR202:

- в діапазоні вимірювання $W = 20 \div 95\%$ при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ змінюється від 1 до 90 кГц/%;
- в діапазоні вимірювання $W = 20 \div 90\%$ при $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ змінюється від 1 до 80 кГц/%;
- в діапазоні вимірювання $W = 20 \div 85\%$ при $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ змінюється від 1 до 70 кГц/%;
- в діапазоні вимірювання $W = 20 \div 80\%$ при $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ змінюється від 1 до 65 кГц/%;

Отже, можна зробити висновок, що нова розробка має найбільшу чутливість до вимірювального параметра – вологості при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Висновки

Розроблено мікроелектронний вимірювач вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202. Проведено математичне моделювання розробки, на основі якого визначено аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Експериментально та теоретично встановлено, що

температура суттєво впливає на діапазон відносної вологості досліджуваного середовища. Із зростанням температури діапазон відносної вологості та частота генерації розробленого мікроелектронного вимірювача вологості зменшується. Найбільшу чутливість вимірювач вологості має при $T = 20^\circ\text{C}$. Середнє значення чутливості при $T = 20^\circ\text{C}$ в діапазоні вимірювання $W = 20 \pm 95\%$ дорівнює $45 \text{ кГц}/\%$.

Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель описує поведінку мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з похибкою $\pm 1,5\%$.

Література

1. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical. – 30 March 2006. – Vol. 114. – № 1. – P. 254–262.
2. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // Sensors. – 2014. – № 14. – P. 7881–7939. doi: 10.3390/s140507881.
3. Mario, Pelino. Principles and applications of ceramic humidity sensors / Mario Pelino, Carlo Cantalini // Active and Passive Elec. Comp. – 1994. – Vol. 16. – P. 69–87.
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 / 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.
5. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor / Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder // Journal of microelectromechanical system. – february 2010. – Vol. 19. – № 1. – P. 183–191. doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.
6. Zhi, Chen. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms / Zhi Chen, Chi Lu // Sensor Letters. – 2005. – Vol. 3. – P. 274 – 295. doi:10.1166/sl.2005.045.
7. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом / Р. Р. Бабаян // Приборы и системы управления. – 1996. – № 11. – С. 24 – 26.
8. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1999. – 275 с.
9. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / [О. В. Осадчук]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2000. – 303 с.
10. Сенсори вологості : монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2003. – 208 с.
11. Пат. № 116661 України. МПК(2017.01) G01N 27/00. Пристрій для вимірювання вологості / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В., Селецька О. О., Мартинюк В. В., Білилівська О. П. – № u2016 13449 ; заявл. 27.12.2016 ; опубл. 25.05.2017. Бюл. № 10.
12. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники / Каяцкас А. А. – М. : Высшая школа, 1988. – 464 с.

References

1. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical. – 30 March 2006. – Vol. 114. – № 1. – P. 254–262.
2. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // Sensors. – 2014. – № 14. – P. 7881–7939. doi: 10.3390/s140507881.
3. Mario, Pelino. Principles and applications of ceramic humidity sensors / Mario Pelino, Carlo Cantalini // Active and Passive Elec. Comp. – 1994. – Vol. 16. – P. 69–87.
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 / 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.
5. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor / Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder // Journal of microelectromechanical system. – february 2010. – Vol. 19. – № 1. – P. 183–191. doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.
6. Zhi, Chen. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms / Zhi Chen, Chi Lu // Sensor Letters. – 2005. – Vol. 3. – P. 274–295. doi:10.1166/sl.2005.045.
7. Babayan R. R. Preobrazovateli neelektricheskikh velichin s chastotnym vyxodom, *Pribory i sistemy upravleniya*. 1996. No. 11, pp. 24–26.
8. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V. Reaktyvni vlastyvoli tranzystoriv i tranzystornykh skhem : monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia», 1999, 275 p.
9. Osadchuk O. V. Mikroelektronni chastotni peretvoriuvachi na osnovi tranzystornykh struktur z vidiemnym oporom: monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia», 2000, 303 p.
10. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Krylyk L. V. Sensory volohosti: monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia», 2003, 208 p.
11. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Krylyk L. V., Seletska O. O., Martyniuk V. V., Bilylivska O. P. *Prystrii dlia vymiruvannia volohosti*. Pat. No.116661 Ukrainy, MPK (2017.01) G01N 27/00, Issue 10.
12. Kayatskas A. A. Osnovy radyoelektroniki. Moskva, Vysshaya shkola, 1988, p. 464.

Рецензія/Peer review : 22.05.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Петрук В. Г.