

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/45>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

Крилик Л.В.

Вінницький національний технічний університет

Звягін О.С.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ

Розроблено математичну модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря. Мікроелектронний частотний перетворювач вологості розроблено на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором на основі двох біполярних транзисторів та вологочутливого ємнісного елемента. Від'ємний диференціальний опір, утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним складником на електродах колектор-колектор біполярної транзисторної структури та індуктивності, приводить до виникнення електричних коливань у контурі автогенераторного перетворювача вологості. Використовуючи середовище Maple, доведена адекватність розробленої математичної моделі. Встановлено, що на виході автогенератора існують періодичні коливання, частота яких змінюється зі зміною ємності вологочутливого елемента $C_w(W)$. Так, при $C_w(W) = 305$ нФ частота $F = 64,53$ МГц, а при $C_w(W) = 354$ нФ частота $F = 58,834$ МГц, при цьому напруга живлення $U = 5$ В.

Для підтвердження теоретичних результатів автогенераторний засіб досліджено у середовищі схемотехнічного моделювання LTSpice. Дослідження проводились у діапазоні зміни вологочутливої ємності від 305 нФ до 354 нФ, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 95%. За результатами моделювання у середовищі LTSpice встановлено, що зі збільшенням ємності вологочутливого елемента від 305 нФ ($W = 20\%$) до 354 нФ ($W = 95\%$) частота сигналу зменшується від 64,516 МГц до 58,823 МГц.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень показали, що на виході автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря існують періодичні коливання, частота яких буде зменшуватись зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 1,5%.

Ключові слова: частотний перетворювач вологості, вологочутливий ємнісний елемент, від'ємний диференціальний опір, періодичні коливання, частота.

Постановка проблеми. Стан сучасного науково-технічного прогресу суттєво визначається успішним розв'язанням питань створення та освоєння випуску автоматичних засобів інформаційно-вимірювальних систем, приладів вимірювального контролю, біомедичних пристроїв, систем визначення якості продукції, а також визначення параметрів довкілля. Ефективність

вищезгаданого комплексу технічних засобів насамперед залежить від якості вимірювальних перетворювачів, які є основними чутливими пристроями інформаційно-вимірювальних систем [1; 2, с. 256–272, 337–359; 3, с. 43–50, 398–406; 4; 5; 6; 7; 8].

Важливою різновидністю перетворювачів фізичних величин є сенсори вологості.

Вимірювання та контроль вологості є одним із поширених напрямів вимірювань фізичних величин. Такий напрям зумовлений потужним промисловим та науково-технічним потенціалом нашої країни та великим різноманіттям промислових галузей (наприклад, енергетика, металургія, машинобудування, хімічна промисловість), ефективність яких значною мірою залежить від чутливості та точності вимірювань вологості, тиску, температури та інших фізичних величин. Тому досить важливим завданням сучасної автоматизації та контрольно-вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання вологості для конкретних виробництв та застосувань, створення вимірювальних приладів та систем необхідної чутливості й точності, швидкодії і стабільності, а також дослідження впливів на результати вимірювань впливу неінформативних параметрів [9, с. 11–18, 123–124].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині серед первинних перетворювачів різного типу вагоме місце у вимірювальній техніці посідають сенсори вологості. Необхідність вимірювального контролю вологості як у промисловості, так і в побуті робить актуальною проблему розроблення та дослідження сенсорів вологості різних типів, принцип роботи яких оснований на зміні електрофізичних параметрів.

Зазначимо, що сучасний стан науки та техніки висуває високі вимоги до засобів вимірювання вологості. Це насамперед зумовлено потребою в автоматизації технологічних процесів. Крім того, питання вивчення, розроблення та виготовлення засобів вимірювання вологості нині є актуальним [1; 4; 5; 6; 7; 8; 10]. Серед великого різноманіття сенсорів вологості практичний інтерес мають мікроелектронні сорбційні сенсори вологості. Принцип дії таких сенсорів заснований на явищі сорбції вологи з досліджуваного середовища.

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, які реалізують принцип перетворення «вологість-частота», дозволяє значно підвищити чутливість, точність вимірювання вологості та спростити схеми подальшої обробки інформації. У цьому разі необхідно використовувати вологочутливий елемент у вигляді ємності, який є найоптимальнішим за сукупністю параметрів, а саме забезпечує широкий діапазон вимірювань, високу надійність, низьку вартість у разі використання мікроелектронної технології. Завдяки чому маємо мініатюрні габарити чутливого елемента

[10, с. 235–267; 11; 12; 13; 14; 15; 16, с. 6–8; 17, 18, 19, 20]. Тобто для вимірювання вологості ємнісний метод є одним з найкращих.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка та дослідження математичної моделі мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, вологочутливим елементом якої слугує ємнісний елемент. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання: 1) провести аналіз наявних наукових джерел та обґрунтувати переваги застосування реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором; 2) розрахувати електричні характеристики мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря, в яких враховано залежність реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором від впливу відносної вологості навколишнього середовища; 3) зробити висновки з проведеного дослідження.

Теоретичні та експериментальні дослідження. Метою роботи є розробка мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000. На рис. 1 представлена електрична схема мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря.

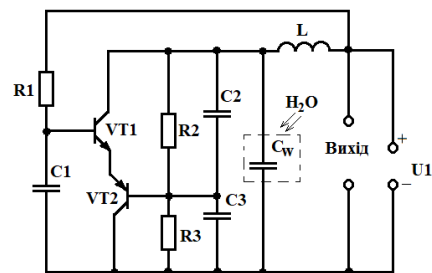


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості

Мікроелектронний автогенераторний пристрій для вимірювання відносної вологості повітря з вологочутливим ємнісним елементом розроблено на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором на основі двох біполярних транзисторів VT1 та VT2. За допомогою джерела постійної напруги створюється такий режим роботи, коли від'ємний диференціальний опір, який утворений пара-

лельним включенням повного опору з ємнісним складником на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів $VT1$ і $VT2$ та індуктивності L , приводить до виникнення електричних коливань у контурі. Дільник напруги утворюють резистори R_2 і R_3 , які забезпечують живлення схеми за постійним струмом. Резистор R_4 і ємність C_1 слугують фазозсувним ланцюгом для забезпечення балансу фаз в автогенераторному перетворювачі. Вологочутлива ємність C_W включена паралельно повному опору з ємнісним складником на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів $VT1$ і $VT2$. У разі дії вологи на вологочутливу ємність C_W змінюється ємнісний складник повного опору на електродах транзисторної структури на основі біполярних транзисторів $VT1$ і $VT2$, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

Для експериментального дослідження схема мікроелектронного автогенераторного перетворювача вологості з вологочутливим ємнісним елементом на основі НСН-1000 (рис. 1) була зібрана на біполярних транзисторах ВFP450 та ВFT92. Режим біполярних транзисторів $VT1$ і $VT2$ по постійному струму був таким: струм у ланцюзі колектора транзистора $VT1$ дорівнює 4,25 мА, а напруга на колекторі – 5 В.

Для визначення електричних характеристик, в яких враховано залежність реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором від впливу відносної вологості досліджуваного середовища, розроблено еквівалентну схему автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000 (рис. 2).

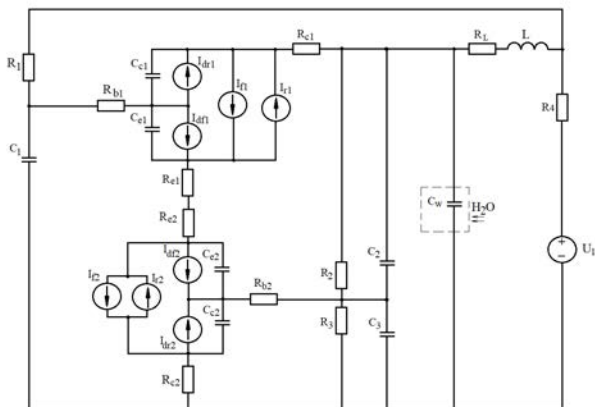


Рис. 2. Еквівалентна схема автогенераторного засобу для вимірювання вологості з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000

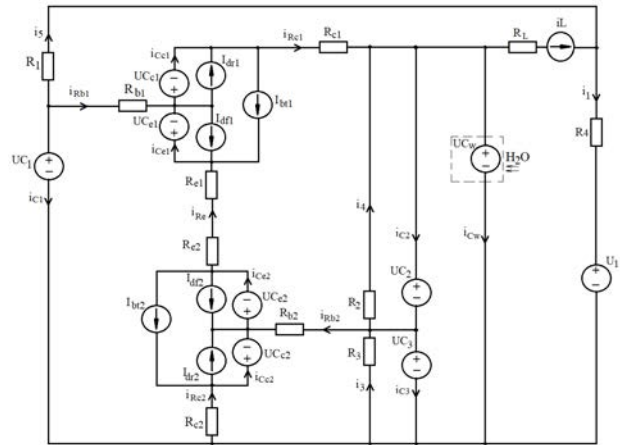


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема автогенераторного засобу для вимірювання вологості з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000

Для зручності розрахунків, об'єднавши струми I_f і I_r у $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$, а також скориставшись методом змінних стану, на рис. 3 подано перетворену еквівалентну схему розробки. На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа:

$$\begin{cases}
 U_L = i_5 R_1 - i_{R_{b1}} R_{b1} - i_L R_L - i_{R_{c1}} R_{c1} - U_{C_{c1}}, \\
 i_{R_e} = (i_4 R_2 - i_{R_{b2}} R_{b2} - i_{R_{c2}} R_{c2} - U_{C_{c1}} - U_{C_{c2}} - U_{C_{c1}}) / R_{e_e}, \\
 i_{R_{b2}} = (U_{C_{c2}} + i_{R_{c2}} R_{c2} - i_3 R_3) / R_{b2}, \\
 i_{R_{b1}} = (U_{C_{c2}} + U_{C_{c1}} + U_{C_{c2}} + U_{C_1} + i_{R_{c2}} R_{c2} + i_{R_e} R_{e_e}) / R_{b1}, \\
 i_1 = (U_{C_W} - U_1 - U_L - i_L R_L) / R_4, \\
 i_3 = -U_{C_3} / R_3, \\
 i_4 = -U_{C_4} / R_4, \\
 i_{R_{c1}} = (U_{C_1} - U_{C_{c1}} - U_{C_W} - i_{R_{b1}} R_{b1}) / R_{c1}, \\
 i_{C_1} = -i_5 - i_{R_{b1}}, \\
 i_{C_W} = i_3 - i_1 - i_{C_1} - i_{C_3} + i_{R_{c2}}, \\
 i_{C_{c1}} = i_{R_{c1}} + I_{bt1} - I_{df1}, \\
 i_{C_2} = i_4 - i_{C_W} - i_L + i_{R_{c1}}, \\
 i_{C_{e1}} = i_{R_e} + I_{bt1} + I_{df1}, \\
 i_{C_{e2}} = i_{R_e} + I_{bt2} + I_{df2}, \\
 i_{C_{c2}} = i_{C_{e2}} - i_{R_{b2}} - I_{dr2} - I_{df2}, \\
 i_{R_{c2}} = i_{C_{c2}} - I_{bt2} + I_{dr2}, \\
 i_5 = i_1 - i_L, \\
 i_{C_3} = i_3 - i_4 - i_{R_{b2}} + i_{C_2},
 \end{cases} \quad (1)$$

де $R_1, R_2, R_3, C_1, C_2, C_3$ – опори та ємності дільників напруги; $R_{b1}, R_{b2}, R_{e1}, R_{e2}, R_{c1}, R_{c2}$ – об'ємні опори бази, емітера, колектора транзисторів $VT1$ і $VT2$; R_{e_e} – загальний опір емітерів транзисторів $VT1$ і $VT2$; $C_{e1}, C_{e2}, C_{c1}, C_{c2}$ – ємності емітерного та колекторного переходів транзисторів $VT1$

і $VT2$; C_w – вологочутливий ємнісний елемент; L – індуктивність; U_1 – джерело живлення постійної напруги; I_{dr1} , I_{dr2} , I_{df1} , I_{df2} – струми внутрішніх переходів база-колектор та база-емітер транзисторів $VT1$ і $VT2$; I_{f1} , I_{f2} , I_{r1} , I_{r2} – прямий та зворотний струми транзисторів $VT1$ і $VT2$.

Вважаючи заданими значення відповідних напруг на ємностях та струм через індуктивність, розв'яжемо систему рівнянь (1) відносно U_L , i_{C_w} , i_{C_1} , i_{C_2} , i_{C_3} , $i_{C_{e1}}$, $i_{C_{e2}}$, $i_{C_{c1}}$, $i_{C_{c2}}$.

$$\begin{cases} U_L = U_{C_w} - U_{C_{e1}} + A_6 R_1 - i_L(R_1 + R_L) - A_3, \\ i_{C_w} = A_5 - A_6 + i_{C_{e2}} - I_{br2} + I_{dr2} - i_{C_1} - i_{C_3}, \\ i_{C_1} = -A_6 + i_L - A_{10}, \\ i_{C_2} = A_4 - i_{C_w} - i_L + A_{11}, \\ i_{C_3} = -A_5 + A_4 - A_8 + i_{C_2}, \\ i_{C_{e1}} = A_9 + I_{br1} + I_{df1}, \\ i_{C_{e2}} = A_9 + I_{br2} + I_{df2}, \\ i_{C_{c1}} = A_{11} + I_{br1} - I_{dr1}, \\ i_{C_{c2}} = i_{C_{e2}} - A_8 - I_{dr2} - I_{df2}, \end{cases} \quad (2)$$

де $R_{ee} = R_{e1} + R_{e2}$, $A_1 = U_{C_{e1}} + U_{C_{e2}} + U_{C_{c1}}$, $A_2 = U_{C_{e2}} + U_{C_{e1}} + U_{C_{c2}} + U_{C_1}$, $A_3 = U_{C_1} - U_{C_{c1}}$, $A_4 = U_{C_1} / R_4$, $A_5 = U_{C_3} / R_3$, $A_6 = (U_{C_w} - U_1 - U_L - i_L R_L) / R_4$, $A_7 = (i_{C_{e2}} - I_{br2} + I_{dr2}) \cdot R_{c2}$, $A_8 = (U_{C_{e2}} + A_7 + U_{C_3}) / R_{b2}$, $A_9 = (A_4 R_2 - A_8 R_{b2} - A_7 - A_1) / R_{ee}$, $A_{10} = (A_2 + A_7 + A_9 R_{ee}) / R_{b1}$, $A_{11} = (A_3 - U_{C_w} - A_{10} R_{b1}) / R_{c1}$.

Проведемо заміну у лівій частині рівнянь системи рівнянь (2) у відповідності до виразів, які описують струми в ємностях $i_c(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt}$ і напруги в індуктивностях $U_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$, а також врахуємо, що всі напруги та струми у системі змінюються в часі [20]:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = U_{C_w}(t) - U_{C_{e1}}(t) + A_6 R_1 - i_L(R_1 + R_L) - A_3, \\ C_w \frac{dU_{C_w}(t)}{dt} = A_5 - A_6 + i_{C_{e2}} - I_{br2} + I_{dr2} - i_{C_1} - i_{C_3}, \\ C_1 \frac{dU_{C_1}(t)}{dt} = -A_6 + i_L - A_{10}, \\ C_2 \frac{dU_{C_2}(t)}{dt} = A_4 - i_{C_w} - i_L + A_{11}, \\ C_3 \frac{dU_{C_3}(t)}{dt} = -A_5 + A_4 - A_8 + i_{C_2}, \\ C_{e1} \frac{dU_{C_{e1}}(t)}{dt} = A_9 + I_{br1} + I_{df1}, \\ C_{e2} \frac{dU_{C_{e2}}(t)}{dt} = A_9 + I_{br2} + I_{df2}, \\ C_{c1} \frac{dU_{C_{c1}}(t)}{dt} = A_{11} + I_{br1} - I_{dr1}, \\ C_{c2} \frac{dU_{C_{c2}}(t)}{dt} = i_{C_{e2}} - A_8 - I_{dr2} - I_{df2}. \end{cases} \quad (3)$$

□ Система рівнянь (3) є нелінійною, оскільки містить у собі нелінійні елементи, а саме дже-

рела струмів I_{dr} , I_{df} , $I_{br} = (I_f - I_r) / QB$ та ємності C_e , C_c [20]:

$$\begin{aligned} I_f &= I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{VT \cdot NF}} - 1 \right), \quad I_r = I_S \left(e^{\frac{V_{BC}}{VT \cdot NR}} - 1 \right), \\ I_{df} &= \frac{I_f}{BF}, \quad I_{dr} = \frac{I_r}{BR}, \end{aligned} \quad (4)$$

де I_S – струм насичення біполярного транзистора; V_{BE} , V_{BC} – напруги на внутрішніх точках база-емітер, база-колектор; VT – температурний потенціал; NF , NR – коефіцієнти неідеальності в нормальному та інверсному режимах; BF , BR – максимальні коефіцієнти передачі струму за схемою із загальним емітером у нормальному та інверсному режимах; QB – коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора.

Ємності біполярного транзистора мають дифузійний та бар'єрний складники. Розглянемо окремо ємність колекторного переходу C_c [20]:

$$\begin{aligned} C_c bar &= \begin{cases} \frac{CJC}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{JC}}\right)^{MJC}}, & V_{BC} < 0; \\ CJC, & V_{BC} \geq 0. \end{cases} \\ C_c &= C_c dif + C_c bar, \quad C_c dif = \frac{(I_r + I_S) \cdot TR}{VT \cdot NR}. \end{aligned} \quad (5)$$

Ємність емітерного переходу C_e запишеться як [20]:

$$\begin{aligned} C_e bar &= \begin{cases} \frac{CJE}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_{JE}}\right)^{MJE}}, & V_{BE} < 0; \\ CJE, & V_{BE} \geq 0, \end{cases} \\ C_e &= C_e dif + C_e bar; \quad C_e dif = \frac{(I_f + I_S) \cdot TF}{VT \cdot NF}; \end{aligned} \quad (6)$$

де $C_c dif$, $C_c bar$, $C_e dif$, $C_e bar$ – дифузійні і бар'єрні ємності колекторного та емітерного переходів; V_{JE} , V_{JC} – контактна різниця потенціалів переходів; TF , TR – час переносу заряду через базу в нормальному та інверсному режимах; MJE , MJC – коефіцієнти плавності переходів; CJE , CJC – ємність емітерного і колекторного переходів у разі нульового зміщення.

Система рівнянь (3) є динамічною математичною моделлю автогенераторного засобу для вимірювання вологості повітря, яка дозволяє визначити значення напруги та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу.

Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми у середовищі Maple. Розрахунок показує,

що на виході автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря справді будуть існувати періодичні коливання (рис. 4), частота яких буде змінюватись зі зміною ємності вологочутливого сенсора $C_w(W)$.

Так, при $C_w(W) = 305$ пФ частота $F = 64,530$ МГц, а при $C_w(W) = 354$ пФ частота $F = 58,834$ МГц, при цьому напруга живлення $U = 5$ В. Для підтвердження теоретичних результатів та проведення експериментальних досліджень електричне коло автогенераторного засобу для вимірювання вологості з вологочутливим ємнісним елементом (рис. 1) було досліджене у середовищі схемотехнічного моделювання LTSpice. Дослідження проводились у діапазоні зміни вологочутливої ємності від $C_w(W) = 305$ пФ до $C_w(W) = 354$ пФ, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 95%.

За результатами моделювання у середовищі LTSpice легко бачити, що на ємності C_5 діє гармонічна напруга (рис. 6). Підрахувавши частоту напруги вологочутливої ємності, можна побачити, що зі збільшенням ємності вологочутливого елемента від 305 пФ ($W = 20\%$) до 354 пФ ($W = 95\%$) частота сигналу зменшується від 64,516 МГц до 58,823 МГц. Так, на рис. 6 наведено експериментальну залежність напруги на вологочутливій ємності від часу за відносної вологості повітря $W = 20\%$, при цьому частота вихідного сигналу дорівнює $F = 64,516$ МГц. На рис. 7 наведено експериментальну залежність напруги на вологочутливій ємності від часу за відносної вологості повітря $W = 95\%$, що відповідає значенню вологочутливої ємності $C_w(W) = 354$ пФ, при цьому частота вихідного сигналу дорівнює $F = 58,823$ МГц.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень легко бачити, що на виході мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості повітря справді будуть існувати періодичні коливання, частота яких буде зменшуватись зі збільшенням значення відносної вологості повітря.

Порівнявши отримані теоретичні та експериментальні значення частоти вихідного сигналу, було встановлено, що відносна похибка не перевищує 1,5%.

Висновки. Розроблено математичну модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000. Використовуючи середовище Maple, доведена адекватність розробленої математичної моделі. Встановлено, що на виході автогенератора існують

періодичні коливання, частота яких змінюється зі зміною ємності вологочутливого елемента $C_w(W)$. Так, при $C_w(W) = 305$ пФ частота $F = 64,53$ МГц, а при $C_w(W) = 354$ пФ частота $F = 58,834$ МГц, при цьому напруга живлення $U = 5$ В.

Для підтвердження теоретичних результатів автогенераторний засіб досліджено у середовищі

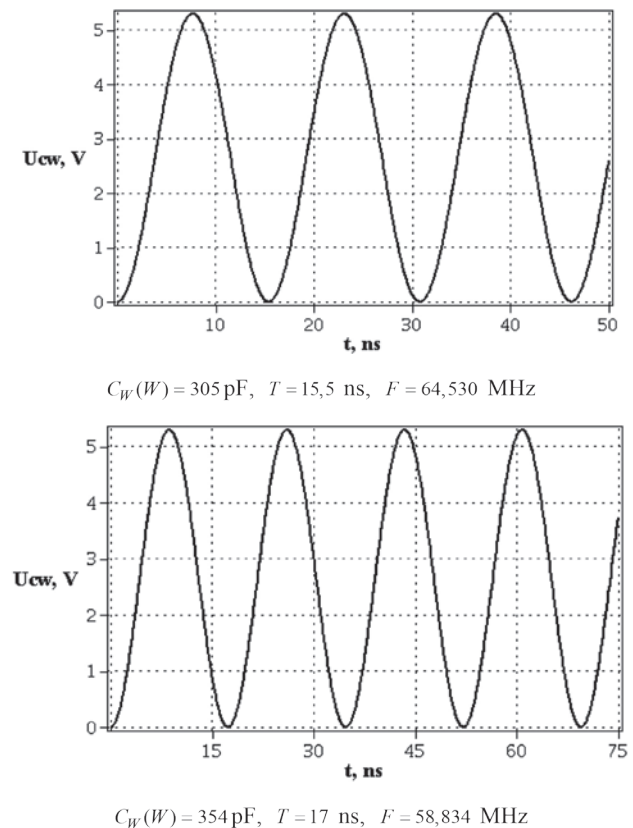


Рис. 4. Зміна напруги вологочутливої ємності від часу за різних значень ємності вологочутливого сенсора

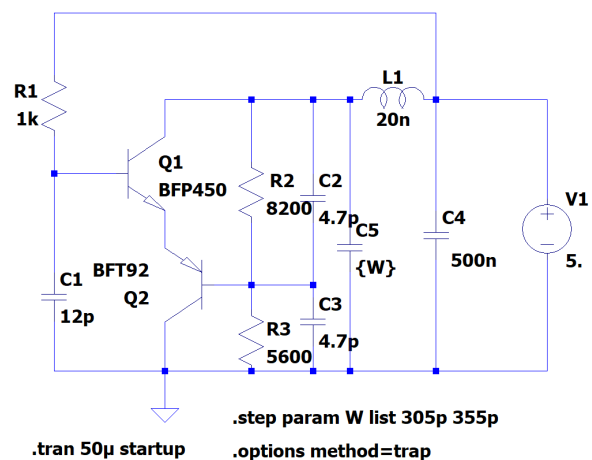


Рис. 5. Електрична схема мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості в LTSpice

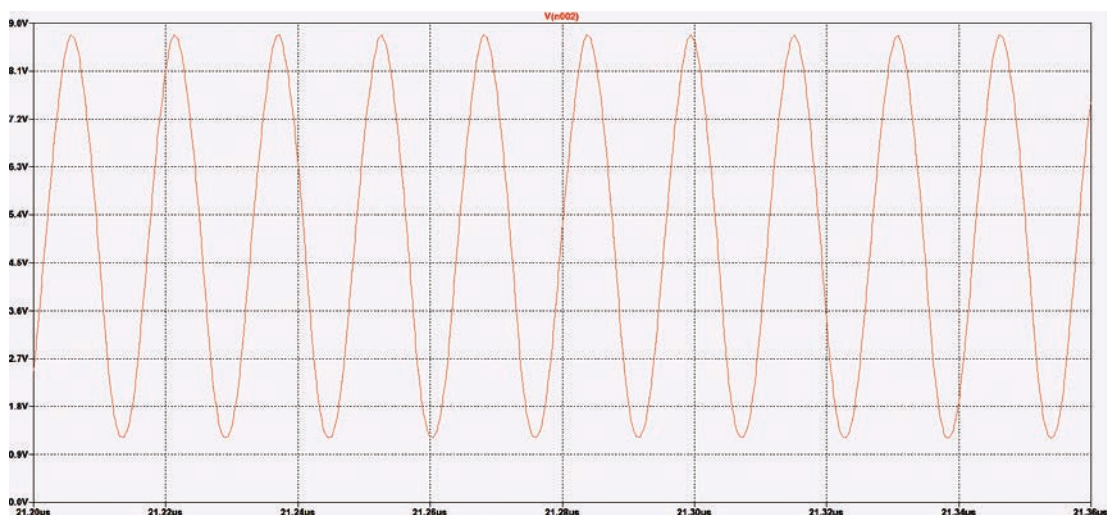


Рис. 6. Експериментальна залежність напруги вологочутливої ємності від часу за відносної вологості повітря $W = 20\%$

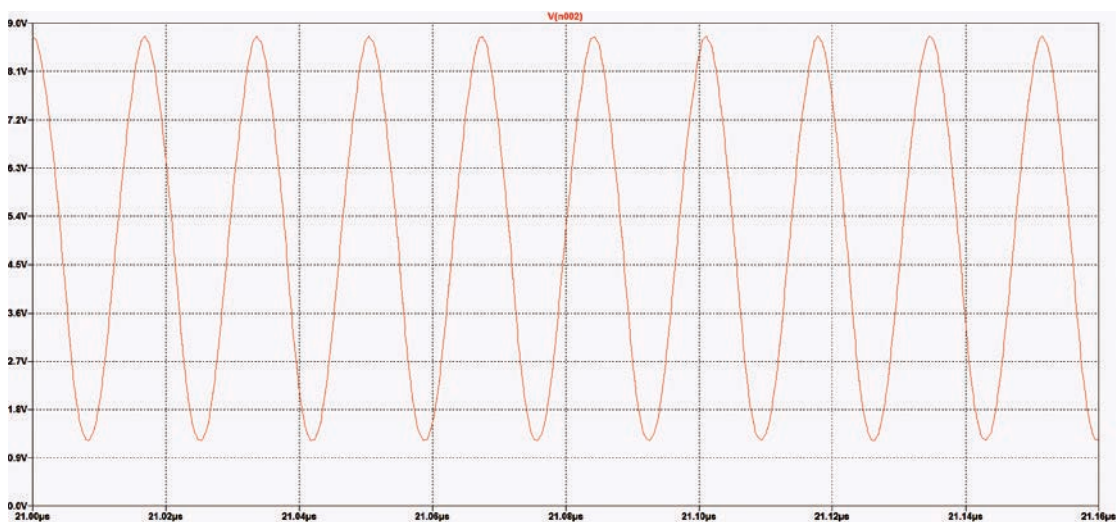


Рис. 7. Експериментальна залежність напруги вологочутливої ємності від часу за відносної вологості повітря $W = 95\%$

схемотехнічного моделювання LTSpice. Дослідження проводились у діапазоні зміни вологочутливої ємності від 305 пФ до 354 пФ, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 95%. За результатами моделювання у середовищі LTSpice встановлено, що зі збільшенням ємності вологочутливого елемента від 305 пФ ($W = 20\%$) до 354 пФ ($W = 95\%$) частота сигналу зменшується від 64,516 МГц до 58,823 МГц.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень показали, що на виході автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря існують періодичні коливання, частота яких буде зменшуватись зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 1,5%.

Список літератури:

1. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nanoporous Polymer Membranes. Appeared in *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Vol. 114. No. 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. Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2014. No.14. P. 7881–7939.
5. Mario Pelino, Carlo Cantalini. Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Elec. Comp.* 1994. Vol. 16. P. 69–87.
6. Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman. 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. No. 16. P. 1135.
7. Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of microelectromechanical system*. 2010. Vol. 19. No. 1. P. 183–191.
8. Zhi Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. 2005. Vol. 3. P. 274–295.
9. Маргелов А. Датчики влажности компании Honeywell. *Chip News*. 2005. № 8(101). С. 40–42.
10. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В. Сенсори вологості : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2003. 208 с.
11. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница : «Универсум-Винница», 1999. 275 с.
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletskia O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2019. 111761I.
13. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 2017, 104451X.
14. Osadchuk A., Osadchuk V., Seletskia O., L. Krylik L. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, R. 95. Warszawa, Poland. 2019. No. 4. P. 237–241.
15. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Селецька О.О. Математична модель мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. № 5 (277). С. 195–198.
16. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Осадчук Я.О. Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом. *Прикладні питання математичного моделювання*. Т. 3. № 2.1. 2020. С. 206–215.
17. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Звягін О.С. Проблеми вимірювання вологості нафтопродуктів та метод підвищення його точності. *Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління*. 2010. № 1 (27). С. 135–139.
18. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В., Селецька О.О., Мартинюк В.В. Мікроелектронний перетворювач «вологість-частота» з ємнісними елементами на основі вологочутливих пористих шарів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 1 (257). С. 83–87.
19. Осадчук О.В., Звягін О.С., Савицький А.Ю., Барабан С.В., Селецька О.О. The radiomeasuring humidity sensor with the frequency output signal. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2016. № 6. С. 216–218.
20. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Звягін О.С. Частотні перетворювачі для контролю вологості нафтопродуктів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2014. 152 с.

Osadchuk A.V., Krylik L.V., Zviahin O.S., Osadchuk I.A. MATHEMATICAL MODEL OF A MICROELECTRONIC GENERATING MEAN FOR MEASURING HUMIDITY

A mathematical model of a microelectronic autogenerating device for measuring the relative humidity of air has been developed. The microelectronic frequency transducer of humidity is developed on the basis of a transistor structure with a negative differential resistance based on two bipolar transistors and a capacitive element that is sensitive to moisture. The negative differential resistance obtained by parallel connection of the impedance with a capacitive component on the collector-collector electrodes of the bipolar transistor structure and inductance leads to the occurrence of electrical oscillations in the circuit of the autogenerating humidity transducer. Using the Maple environment, the adequacy of the developed mathematical model has been proved. It was found that there are periodic oscillations at the output of the autogenerator, the frequency of which changes with a change in the capacitance of the humidity sensitive element. So, at 305 pF the frequency is 64.53 MHz, and at 354 pF the frequency is 58.82 MHz, while the supply voltage is 5 V.

To confirm the theoretical results, the autogenerating means were investigated in the LTSpice circuit simulation environment. The studies were carried out in the range of variation of the humidity sensitive capacitance from 305 pF to 354 pF, which corresponds to an increase in the value of the relative air humidity from 20% to 95%. Based on the results of modelling in the LTSpice environment, it was found that with an increase in the capacitance of the humidity sensitive element from 305 pF ($W = 20\%$) to 354 pF ($W = 95\%$), the signal frequency decreases from 64.516 MHz to 58.823 MHz.

The results of theoretical and experimental studies have shown that at the output of an autogenerating device for measuring the relative humidity of air, there are periodic fluctuations, the frequency of which will decrease with an increase in the value of the relative humidity of the air. The obtained theoretical and experimental studies are in good agreement, the relative error does not exceed 1.5%.

Key words: *frequency transducer of humidity, humidity sensitive capacitive element, negative differential resistance, periodic oscillations, frequency.*