

# Радіовимірювальний Перетворювач Концентрації Газу на Транзисторній Структурі з Від'ємним Опором

О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук  
кафедра радіотехніки  
Вінницький національний технічний університет  
Вінниця, Україна  
osadchuk69@mail.ru

## Radiomeasuring Transducer of Gas Concentration in Transistor Structure with Negative Resistance

A. Osadchuk, V. Osadchuk, I. Osadchuk  
Department of Radioengineering  
Vinnytsia National Technical University  
Vinnytsia, Ukraine  
osadchuk69@mail.ru

**Анотація** — В статті розглянуто радіовимірювальний перетворювач концентрації газу з чутливим до концентрації горючих газів MEMS резистивним елементом MiCS 6814. Розраховано та експериментально підтверджено залежності активної та реактивної складових повного опору радіовимірювального перетворювача концентрації газу від напруги живлення та керування і від зміни концентрації газу. Отримано аналітичні вирази функції перетворення і рівняння чутливості. Чутливість розробленого перетворювача в діапазоні від 1 до 1500 ppm змінюється від 645 до 175 Гц/ppm, а при збільшенні концентрації пропану чутливість значно зменшується, і в діапазоні від 1500 ppm до 9000 ppm складає від 175 Гц/ppm до 48 Гц/ppm.

**Abstract** — In the article the radiomeasuring transducers of the gas concentration sensing the concentration of combustible gases resistive MEMS element MiCS 6814. Calculated and experimentally confirmed depending active and reactive components of the impedance transducers gas concentration of supply voltage and control and on changes in gas concentration. Analytical expressions conversion function and sensitivity equation. Sensitivity converter developed a range of 1 to 1500 ppm ranges from 645 to 175 Hz/ppm, while increasing the concentration of propane is significantly reduced sensitivity and range from 1500 ppm to 9000 ppm is from 175 Hz/ppm to 48 Hz/ppm.

**Ключові слова**—радіовимірювальний перетворювач концентрації газу; MEMS сенсор; частотний вихідний сигнал; від'ємний опір.

**Keywords**—radiomeasuring transducer gas concentration; MEMS sensor; frequency output signal; negative resistance.

### I. ВСТУП

Одним із нових наукових напрямків створення радіовимірювальних перетворювачів концентрації газу є використання реактивних властивостей напівпровідникових елементів з від'ємним опором. Це дозволяє перетворювати концентрацію газу в частотний вихідний сигнал, що забезпечує високу завадостійкість, а отже, і високу точність вимірювання концентрації газу. Окрім того, радіовимірювальні перетворювачі з частотним вихідним сигналом поєднують як простоту, так і універсальність, які властиві аналоговим пристроям, а також точність та завадостійкість, що характерні для перетворювачів з кодовим виходом. Вони володіють високою чутливістю до вимірюваних параметрів, малою масою, габаритами, інформаційною, конструктивною і технологічною сумісністю з мікроелектронними засобами обробки інформації, що забезпечує їх перевагу над існуючими сенсорами концентрації газу [1–3].

З метою вивчення властивостей радіовимірювального перетворювача концентрації газу необхідно розробити математичну модель, яка описує залежність частоти генерації від концентрації газу, тобто є функцією перетворення, на основі якої отримують чутливість перетворювача. В свою чергу функція перетворення залежить від активної і реактивної складових повного вихідного опору перетворювача. Розгляду цих питань присвячена дана робота.

## II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

На рис.1 показана схема радіовимірювального перетворювача концентрації газу з чутливим до концентрації горючих газів MEMS резистивним елементом MiCS 6814, що дозволяє створити автогенераторний пристрій. Живлення транзисторів VT1 і VT2 здійснюється джерелами постійної напруги U1 і U2.

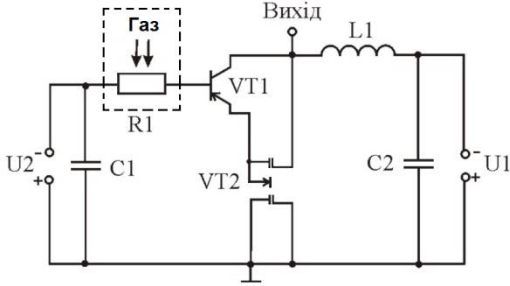


Рис. 1. Електрична схема радіовимірювального перетворювача концентрації газу

Математична модель описує залежність активної і реактивної складових повного вихідного опору структури від концентрації газу, що дозволяє отримати аналітичний вираз функції перетворення та рівняння чутливості перетворювача. Розрахунки моделі виконано на основі еквівалентних схем для змінного струму біполярного та МДН-транзистора, які складають радіовимірювальний перетворювач концентрації газу (рис. 2).

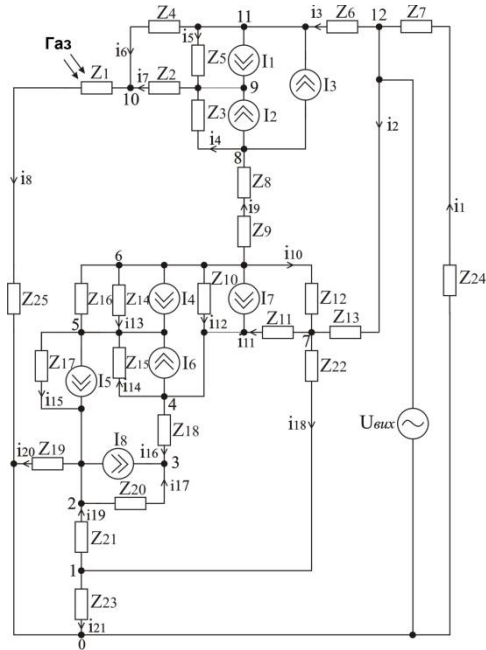


Рис. 2. Еквівалентна схема перетворювача концентрації газу для змінного струму

Вольт-амперна характеристика транзисторної структури, на основі якої створено радіовимірювальний перетворювач концентрації газу, має ділянку від'ємного опору. Від'ємний опір дозволяє компенсувати втрати в

коливальному контурі, який утворений еквівалентною ємністю на електродах колектор-стік біполярного транзистора VT1 та МДН-транзистора VT2 та зовнішньою індуктивністю [3-6]. Для визначення складових повного вихідного опору перетворювача необхідно вирішити систему рівнянь Кірхгофа, складено на основі еквівалентної схеми (див. рис. 2), прийнявши вузол 0 як базисний, що має вигляд

$$\begin{cases} 0 = -\phi_1(y_{18} + y_{19} - y_{21}) - \phi_2 y_{19} + \phi_7 y_{18}; \\ I_8 - I_5 = \phi_1 y_{19} - \phi_2(y_{19} + y_{20} + y_{17} + y_{15}) + \phi_3 y_{17} + \phi_5 y_{15}; \\ -I_8 = \phi_2 y_{17} + \phi_3(y_{16} - y_{17}) + \phi_4 y_{16}; \\ I_6 - I_1 = \phi_2 y_{16} - \phi_4(y_{16} + y_{14} + y_{12} + y_{11}) + \phi_5 y_{14} + \phi_6 y_{12} + \phi_7 y_{11}; \\ I_5 - I_4 - I_6 = \phi_2 y_{15} + \phi_4 y_{14} - \phi_5(y_{15} - y_{13} - y_{14}) + \phi_6 y_{13}; \\ I_4 + I_8 = \phi_4 y_{12} + \phi_5 y_{13} - \phi_6(y_{13} + y_{12} + y_{10} + y_9) + \phi_7 y_{13} + \phi_8 y_9; \\ 0 = \phi_1 y_{18} + \phi_4 y_{11} + \phi_6 y_{13} - \phi_7(y_{10} + y_{11} + y_2 + y_{18}) + U_{\text{вих}} y_2; \\ I_2 + I_3 = \phi_6 y_9 - \phi_8(y_9 + y_4) + \phi_9 y_4; \\ -(I_2 + I_1) = \phi_8 y_4 - \phi_9(y_4 + y_7 + y_5) + \phi_{11} y_5 + \phi_{10} y_7; \\ 0 = \phi_9 y_7 + \phi_{11} y_6 - \phi_{10}(y_8 + y_7 + y_6); \\ I_1 - I_3 - U_{\text{вих}} y_3 = \phi_9 y_5 - \phi_{11}(y_6 + y_5 + y_3) + \phi_{10} y_6; \\ U_{\text{вих}}(y_3 + y_2 + y_1) = \phi_7 y_2 + \phi_{11} y_3, \end{cases} \quad (1)$$

де провідності гілок схеми визначаються за формулами

$$\begin{aligned} y_1 &= 1/(Z_{24} + Z_7); \quad y_2 = 1/Z_{13}; \quad y_3 = 1/Z_6; \quad y_4 = 1/Z_3; \\ y_5 &= 1/Z_5; \quad y_6 = 1/Z_4; \quad y_7 = 1/Z_2; \quad y_8 = 1/(Z_{25} + Z_1); \\ y_9 &= 1/(Z_8 + Z_9); \quad y_{10} = 1/Z_{12}; \quad y_{11} = 1/Z_{11}; \quad y_{12} = 1/Z_{10}; \\ y_{13} &= (Z_{16} + Z_{14})/(Z_{16} Z_{14}); \quad y_{14} = 1/Z_{15}; \quad y_{15} = 1/Z_{17}; \\ Y_{16} &= 1/Z_{18}; \quad y_{17} = 1/Z_{20}; \quad y_{18} = 1/Z_{22}; \quad y_{19} = 1/Z_{21}; \\ y_{20} &= 1/Z_{19}; \quad y_{21} = 1/Z_{23}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{де } Z_1 &= \frac{R_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_3^2} - j \frac{R_1^2 \omega C_3}{1 + \omega^2 R_1^2 C_3^2}; \quad Z_2 = R_2; \quad Z_3 = -\frac{j}{\omega C_6}; \\ Z_4 &= -\frac{j}{\omega C_4}; \quad Z_5 = -\frac{j}{\omega C_5}; \quad Z_6 = R_3; \quad Z_7 = j\omega L_1; \quad Z_8 = R_5; \\ Z_9 &= R_6; \quad Z_{10} = R_9; \quad Z_{11} = -\frac{j}{\omega C_{11}}; \\ Z_{12} &= \frac{R_7}{1 + \omega^2 R_7^2 C_{12}^2} - j \frac{R_7^2 \omega C_{12}}{1 + \omega^2 R_7^2 C_{12}^2}; \quad Z_{13} = R_8; \quad Z_{14} = -\frac{j}{\omega C_7}; \\ Z_{15} &= -\frac{j}{\omega C_8}; \quad Z_{16} = R_{10}; \quad Z_{17} = -\frac{j}{\omega C_9}; \quad Z_{18} = R_{11}; \quad Z_{19} = R_{15}; \\ Z_{20} &= R_{12}; \quad Z_{21} = \frac{R_{13}}{1 + \omega^2 R_{13}^2 C_{10}^2} - j \frac{R_{13}^2 \omega C_{10}}{1 + \omega^2 R_{13}^2 C_{10}^2}; \quad Z_{22} = -\frac{j}{\omega C_{13}}; \\ Z_{23} &= R_{14}; \quad Z_{24} = -\frac{j}{\omega C_2}; \quad Z_{25} = -\frac{j}{\omega C_1}, \end{aligned}$$

де  $R_1$  – опір чутливого до концентрації горючих газів MEMS резистивного елемента MiCS 6814;  $R_2, R_3, R_5$  – об'ємний опір бази, колектора і емітера біполярного

транзистора VT1 відповідно;  $R_6$ ,  $R_{15}$ ,  $R_8$  та  $R_{14}$  – об’ємні опори витоку, стоку та першого і другого затворів двозатворного МДН-транзистора VT2 відповідно;  $R_7$  – об’ємний опір затвор-витік МДН-транзистора VT2;  $R_8$  – об’ємний опір затвору МДН-транзистора VT2;  $R_9$ ,  $R_{11}$  та  $R_{12}$  – об’ємні опори стік-витік МДН-транзистора VT2 відповідно;  $R_{10}$  – опір підкладки МДН-транзистора VT2;  $R_{13}$  – опір затвор-стік МДН-транзистора VT2;  $R_{15}$  – опір р-п переходу стоку МДН-транзистора VT2;  $C_1$  – ємність конденсатора  $C_1$ ;  $C_2$  – ємність конденсатора  $C_2$ ;  $C_3$  – ємність чутливого до концентрації горючих газів MEMS резистивного елемента MiCS 6814;  $C_4$  – ємність між зовнішнім виводом бази і колектора біполярного транзистора VT1;  $C_5$ ,  $C_6$  – ємності переходу база-колектор та база-емітер транзистора VT1 відповідно;  $C_7$  – ємність підкладка-витік МДН-транзистора VT2;  $C_8$  та  $C_9$  – ємності підкладка-стік МДН-транзистора VT2 відповідно;  $C_{10}$  та  $C_{12}$  – ємності затвор-стік МДН-транзистора VT2 відповідно;  $C_{11}$  – ємність затвор-стік МДН-транзистора VT2;  $C_{13}$  – ємність між першим і другим затвором МДН-транзистора VT2;  $L_1$  – зовнішня індуктивність.

На основі системи рівнянь (1) за допомогою програмного пакету Matlab 7.1. розрахована активна та реактивна складові повного опору, теоретичні та експериментальні залежності яких від концентрації газу показані на рис. 3 та 4.

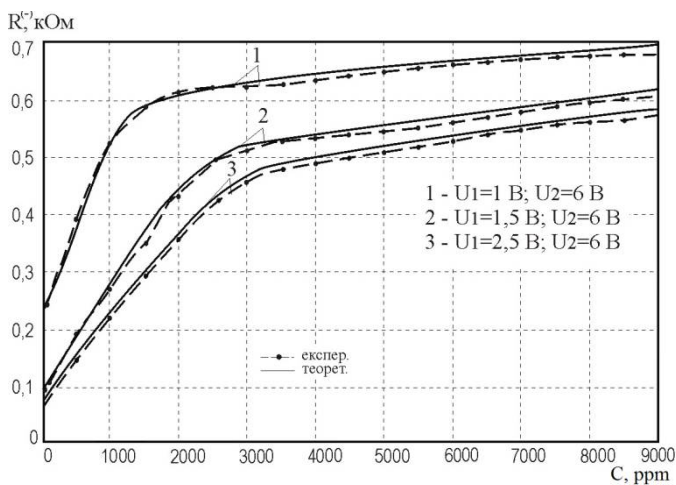


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні залежності активної складової повного опору від концентрації газу

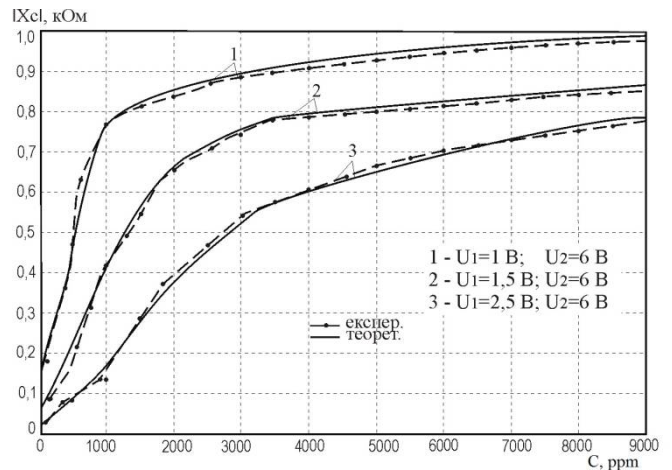


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності реактивної складової повного опору від концентрації газу

З рис. 3 та рис. 4 видно, що із збільшенням концентрації газу активна і реактивна складові повного опору збільшуються.

На рис. 5 подані експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації перетворювача концентрації газу від зміни концентрації пропану ( $C_3H_8$ ).

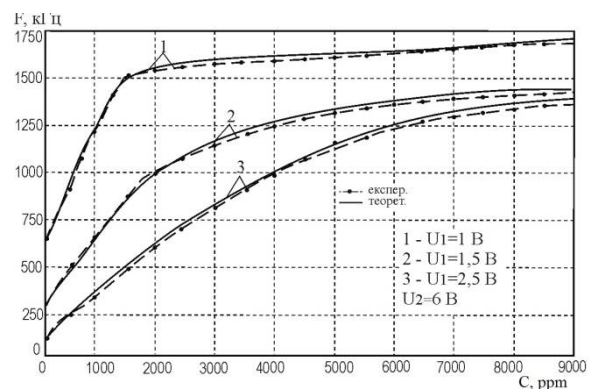


Рис. 5. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального перетворювача концентрації газу від зміни концентрації пропану ( $C_3H_8$ )

Як видно з рис. 5, частота генерації збільшується із збільшенням концентрації газу, а на ділянці від 0 до 2000 ppm спостерігається більша залежність частоти генерації від зміни концентрації пропану.

Залежність частоти генерації від концентрації газу, тобто функція перетворення визначається по контуру зворотного струму згідно з еквівалентною схемою (див. рис. 2) на основі теорії стійкості Ляпунова. Функція перетворення радіовимірювального перетворювача описується виразом (2)

$$F = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} \sqrt{L_1 C_4 (-L_1 C_4 + R_1^2(C) C_3^2 + R_1^2(C) C_3 C_4 + A)}}{L_1 C_3 C_4 R_1(C)}, \quad (2)$$

де

$$A = \sqrt{L_1^2 C_4^2 + 2 L_1 C_3^2 C_4 R_1^2(C) - 2 L_1 C_4^2 C_3 R_1^2(C) + R_1^4(C) C_3^4 + D + R_1^4(C) C_3^2 C_4^2};$$

$$B = 2L_1C_4^2C_3R_1^2(C); \quad D = 2R_1^4(C)C_3^3C_4; \\ C - \text{концентрація газу (ppm)}.$$

На основі (2) визначена чутливість генерації радіовимірювального перетворювача концентрації газу з чутливим до концентрації горючих газів MEMS резистивним елементом МіСS 6814:

$$S_E^F = \frac{1}{4}\sqrt{2}\left(2R_1(C)C_3^2\left(\frac{\partial R_1(C)}{\partial C}\right) + 2R_1(C)C_3C_4\left(\frac{\partial R_1(C)}{\partial C}\right) + \left(\frac{1}{2}\left(4L_1R_1(C)C_4C_3^2\left(\frac{\partial R_1(C)}{\partial C}\right) - 4L_1R_1(E)C_4^2C_3\left(\frac{\partial R_1(C)}{\partial C}\right) + 4R_1^3(C)C_3^4\left(\frac{\partial R_1(C)}{\partial C}\right) + 8R_1^3(E)C_3^3C_4\left(\frac{\partial R_1(C)}{\partial C}\right) + 4R_1^3(C) \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \times C_3^2C_4^2\left(\frac{\partial R_1(C)}{\partial C}\right)\right)\right) / \sqrt{D_1} \left/ \left( \sqrt{-L_1C_4(D_2 + \sqrt{D_1})} \right) \right) - \frac{1}{2}\sqrt{2} \times \\ \times \sqrt{L_1C_4(D_2 + \sqrt{D_1})} \left( \frac{\partial R_1(C)}{\partial C} \right) / (L_1C_4C_3R_1^2(C)), \quad (3)$$

де

$$D_1 = L_1^2C_4^2 + 2L_1C_4C_3^2R_1^2(C) - 2L_1C_4^2C_3R_1^2(C) + R_1^4(C)C_3^4 + \\ + 2R_1^4(C)C_3^3C_4 + R_1^4(C)C_3^2C_4^2;$$

$$D_2 = -L_1C_4 + R_1^2(C)C_3^2 + R_1^2(C)C_4C_3.$$

Графік залежності чутливості від величини освітленості показаний на рис. 6.

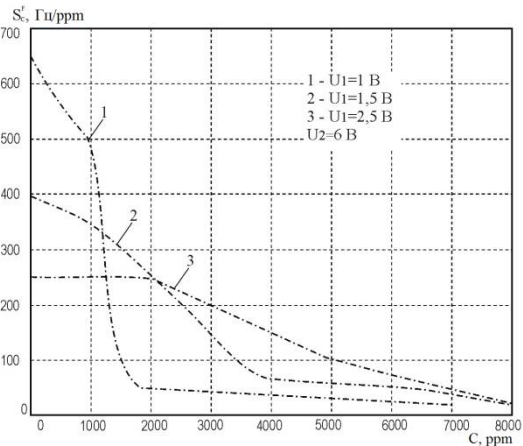


Рис. 6. Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача від концентрації газу

З рис. 6 видно, що максимальну чутливість радіовимірювальний перетворювач концентрації газу з чутливим до концентрації горючих газів MEMS резистивним елементом МіСS 6814 має при напрузі живлення 1 В та напрузі керування 6 В. Із зміною концентрації газу від 1 до 1500 ppm чутливість змінюється від 645 до 175 Гц/ppm. При збільшенні концентрації пропану чутливість значно зменшується, і в діапазоні від 1500 ppm до 9000 ppm складає від 175 Гц/ppm до 48 Гц/ppm.

Визначимо адекватність розробленої моделі в порівнянні з експериментом [8] за формулою

$$\delta_m = \frac{x_m - x_e}{x_e} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

де  $x_m$  – поточне значення параметра моделі;  $x_e$  – поточне експериментальне значення параметра.

Оптимальною напругою керування є величина 3 В, при якій існує найменша зміна частоти генерації в діапазоні від 20 °С до 80 °С.

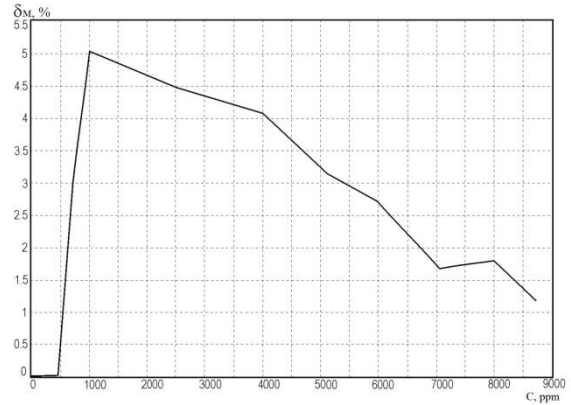


Рис. 7. Залежність відхилення теоретичної моделі від експериментальних значень від концентрації газу

### III. ВИСНОВКИ

Запропоновано схему перетворювача концентрації газу в частоту на основі автогенераторного пристрою. Представлено дослідження параметрів радіовимірювального перетворювача концентрації газу з чутливим до концентрації горючих газів MEMS резистивним елементом МіСS 6814. Отримано аналітичні вирази функції перетворення і рівняння чутливості. Чутливість розробленого перетворювача в діапазоні від 1 до 1500 ppm змінюється від 645 до 175 Гц/ppm, а при збільшенні концентрації пропану чутливість значно зменшується, і в діапазоні від 1500 ppm до 9000 ppm складає від 175 Гц/ppm до 48 Гц/ppm.

### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Мікроелектронні сенсори фізичних величин. За редакцією З.Ю. Готри. В 3 томах. Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.2.
- [2] Новицкий П.В., Кноринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Ленинград: Энергия, 1970.
- [3] Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2000.
- [4] Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. Вінниця: Універсум-Вінниця, 1999.
- [5] Осадчук В.С., Осадчук О.В., Проколова М.О. Сенсори газу. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008.
- [6] Пат. 48600 Україна, МКІ G 01 N 27/12. Мікроелектронний давач газу/ В.С. Осадчук, О.В. Осадчук (Україна). № 2001107207; Заявлено 23.10.2001; Опубл. 15.08.2002, Бюл. № 8.
- [7] Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники. Москва: Высшая школа, 1988.
- [8] Мирский Г. Я. Электронные измерения. Москва: Радио и связь, 1986.