

## **ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З АКТИВНОЮ ІНДУКТИВНІСТЮ**

**Осадчук В.С. д.т.н., проф., Осадчук О.В. д.т.н., проф., Прокопова М.О., асп.**  
Вінницький національний технічний університет (Україна), Тел.(0432)44-04-81,  
E-mail osa@lil.vstu.vinnica.ua

**Annotation.** In article research a transducer of concentration of gas in a frequency signal are represented on the basis of a hybrid integrated circuit, which consists of three bipolar transistors, one of which together with RC-circuit implements an active inductive element of a tuning circuit of a transducer. The analytical expressions of function of conversion and equation of sensitivity are obtained. The theoretical and experimental research has shown, that the sensitivity of a transducer makes 100-600 Hz/ppm.

### **Вступ**

Сучасний рівень розвитку інформаційно-вимірювальної техніки характеризується великою різноманітністю методів перетворення значення концентрацій газу в електричний сигнал. Представлення вимірювальної інформації в аналоговій формі струму чи напруги приводить до необхідності використання аналого-цифрових перетворювачів, вартість яких при високих вимогах до точності можливо зрівняти з вартістю мікро-ЕОМ. Крім того аналого-цифрові перетворювачі потребують додаткових затрат, пов'язаних з забезпеченням захищеності системи від завад, що створює ряд обмежень по використанню традиційних вимірювальних перетворювачів сумісних з цифровими засобами обробки інформації.

Використання частотного сигналу в якості інформативного параметра первинних перетворювачів характеризується високою заводостійкістю, простотою та значною точністю перетворення в цифровий код, а також зручністю комутацій в багатоканальних вимірювальних системах [1].

Отже, для використання цих переваг виникає необхідність у розробці частотних перетворювачів газу з активним індуктивним елементом, що дозволяє повністю застосувати інтегральну технологію для виготовлення приладів.

### **Теоретичні та експериментальні дослідження частотного перетворювача концентрацій газу**

Виконання частотного перетворювача концентрацій газу у вигляді інтегральної схеми потребує застосування плівкової технології для виготовлення пасивного індуктивного елемента у вигляді спіралі, проте її добротність має невелике значення, і по-друге, її розміри на частотах до  $10^6$  Гц несумісні з розмірами інтегральної схеми перетворювача. Тому для вирішення цієї проблеми запропоновано використати індуктивний характер повного опору біполярного транзистора з RC-колом, яке легко виконується у вигляді інтегральної схеми [2]. Отже, схема частотного перетворювача концентрацій газу з активним індуктивним елементом подана на рис.1. Біполярні транзистори VT1, VT2 і VT3 реалізують генератор електричних коливань, в якому коливальний контур утворений ємнісною складовою повного опору на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 та індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор біполярного транзистора VT3. Таким чином, така схема перетворювача повністю реалізується у вигляді інтегральної схеми. Основними параметрами

частотного перетворювача є функція перетворення, тобто залежність частоти генерації від зміни концентрації газу та рівняння чутливості.

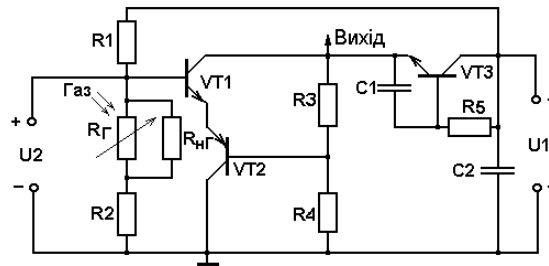


Рис.1. Електрична схема перетворювача на основі двох біполярних транзисторів з активною індуктивністю

Функція перетворення визначається на основі еквівалентної схеми (рис.2) з розрахунком повного опору на електродах колектор-колектор перетворювача, електрична схема якого подана на рис.1. Еквівалентну схему (рис.2) перетворено на більш зручну для проведення розрахунків (рис.3).

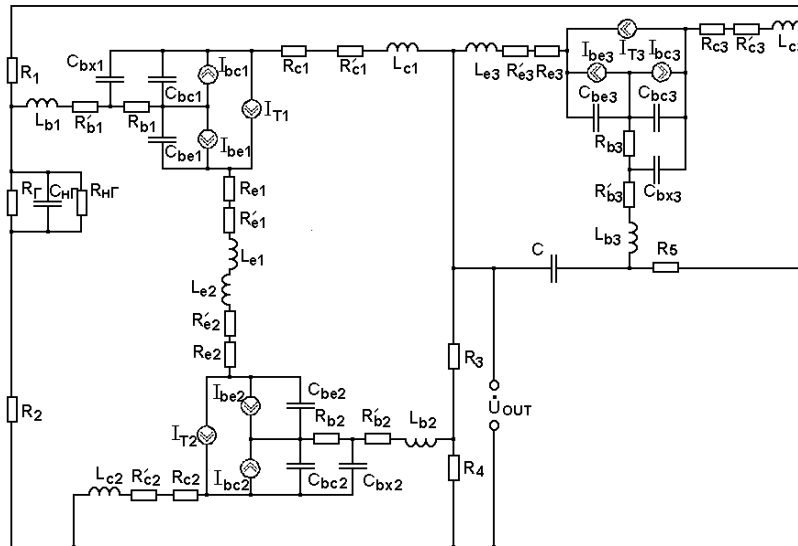


Рис.2. Еквівалентна схема частотного перетворювача на основі двох біполярних транзисторів з активною індуктивністю

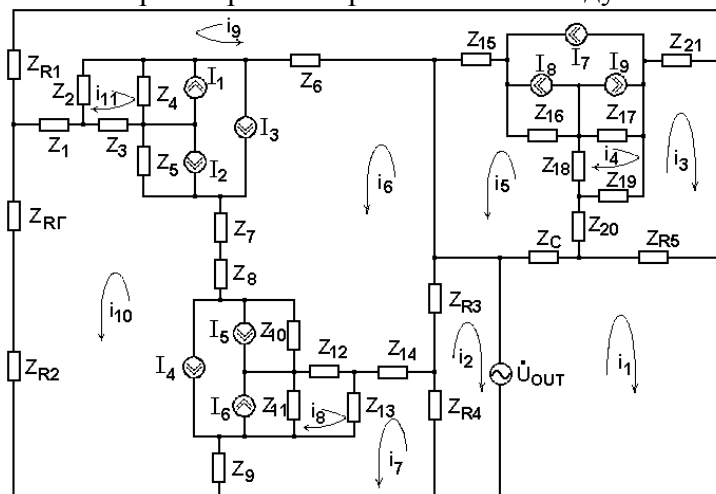


Рис.3. Перетворена нелінійна еквівалентна схема частотного перетворювача на основі двох біполярних транзисторів з активною індуктивністю

Система рівнянь Кірхгофа для змінного струму має вигляд

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{U}_{out} &= (Z_C + Z_{R5})i_1 - Z_{R5}i_3 + Z_C i_5, \\
 \dot{U}_{out} &= (Z_{R3} + Z_{R4})i_2 + Z_{R3}i_6 + Z_{R4}i_7, \\
 0 &= (Z_{R5} + Z_{20} + Z_{19} + Z_{21})i_3 - Z_{R5}i_1 + Z_{20}i_5 - Z_{19}i_4 + Z_{21}i_9, \\
 0 &= (Z_{18} + Z_{19} + Z_{17})i_4 - Z_{19}i_3 + Z_{18}i_5 + Z_{17}i_9 - Z_{17}I_9 + Z_{17}I_7, \\
 0 &= (Z_{15} + Z_{16} + Z_{18} + Z_{20} + Z_C)i_5 - (Z_{15} + Z_{16})i_9 + Z_{18}i_4 + Z_{20}i_3 + Z_C i_1 - Z_{16}I_8 - Z_{16}I_7, \\
 0 &= (Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_{10} + Z_{12} + Z_{14} + Z_{R3})i_6 + Z_{R3}i_2 - Z_6i_9 + Z_4i_{11} + Z_4I_1 - Z_4I_3 - \\
 &- (Z_5 + Z_7 + Z_8 + Z_{10})i_{10} - Z_5I_2 - Z_5I_3 - Z_{10}I_5 - Z_{10}I_4 + Z_{12}i_8 - Z_{14}i_7, \\
 0 &= (Z_9 + Z_{13} + Z_{14} + Z_{R4})i_7 + Z_{R4}i_2 - Z_{14}i_6 + Z_{13}i_8 - Z_9i_{10}, \\
 0 &= (Z_{11} + Z_{12} + Z_{13})i_8 + Z_{11}i_{10} + Z_{13}i_7 + Z_{12}i_6 - Z_{11}I_6 + Z_{11}I_4, \\
 0 &= (Z_{R1} + Z_1 + Z_2 + Z_6 + Z_{15} + Z_{16} + Z_{17} + Z_{21})i_9 - Z_{11}i_{10} - Z_6i_6 + Z_2i_{11} - (Z_{15} + Z_{16})i_5 + \\
 &+ Z_{17}i_4 + Z_{21}i_3 + Z_{16}I_8 + Z_{16}I_7 - Z_{17}I_9 + Z_{17}I_7, \\
 0 &= (Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8 + Z_{10} + Z_{11} + Z_9 + Z_{R2} + Z_{R\Gamma})i_{10} - Z_{11}i_9 + Z_3i_{11} - (Z_5 + Z_7 + \\
 &+ Z_8 + Z_{10})i_6 + Z_5I_2 + Z_5I_3 + Z_{10}I_5 + Z_{10}I_4 - Z_{11}I_6 + Z_{11}I_4 + Z_{11}i_8 - Z_9i_7, \\
 0 &= (Z_2 + Z_3 + Z_4)i_{11} + Z_2i_9 + Z_4i_6 + Z_3i_{10} + Z_4I_1 - Z_4I_3,
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned}
 Z_{R1} &= R_1, \quad Z_1 = R'_{b1} + j\omega L_{b1}, \quad Z_2 = -j/(\omega C_{bx1}), \quad Z_3 = R_{b1}, \quad Z_4 = -j/(\omega C_{bc1}), \quad Z_5 = -j/(\omega C_{be1}), \\
 Z_6 &= R_{c1} + R'_{c1} + j\omega L_{c1}, \quad Z_7 = R_{e1} + R'_{e1} + j\omega L_{e1}, \quad Z_8 = R_{e2} + R'_{e2} + j\omega L_{e2}, \quad Z_9 = R_{c2} + R'_{c2} + j\omega L_{c2}, \\
 Z_{10} &= -j/(\omega C_{be2}), \quad Z_{11} = -j/(\omega C_{bc2}), \quad Z_{12} = R_{b2}, \quad Z_{13} = -j/(\omega C_{bx2}), \quad Z_{14} = R'_{b2} + j\omega L_{b2}, \\
 Z_{15} &= R_{e3} + R'_{e3} + j\omega L_{e3}, \quad Z_{16} = -j/(\omega C_{be3}), \quad Z_{17} = -j/(\omega C_{bc3}), \quad Z_{18} = R_{b3}, \quad Z_{19} = -j/(\omega C_{bx3}), \\
 Z_{20} &= R'_{b3} + j\omega L_{b3}, \quad Z_{21} = R_{c3} + R'_{c3} + j\omega L_{c3}, \quad Z_{R2} = R_2, \quad Z_{R3} = R_3, \quad Z_{R4} = R_4, \quad Z_{R5} = R_5, \\
 Z_C &= -j/(\omega C), \quad Z_{R\Gamma} = R_\Sigma / 1 + \omega^2 R_\Sigma^2 C_{н\Gamma}^2 - jR_\Sigma^2 \omega C_{н\Gamma} / 1 + \omega^2 R_\Sigma^2 C_{н\Gamma}^2, \\
 R_\Sigma &= R_\Gamma \cdot R_{н\Gamma} / R_\Gamma + R_{н\Gamma}.
 \end{aligned}$$

Система рівнянь (1) розв'язана на персональному комп'ютері типу Pentium за допомогою пакету прикладних програм "Matlab 6.0", що дозволило отримати значення повного опору, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер.

На рис.4. подана теоретична і експериментальна залежність активної складової від напруги живлення при різних значеннях напруги керування. Зростання напруги живлення більш 9В ( $U_2=3,5В$ ) приводить до меншої залежності активного опору від  $U_1$ , та на ділянці від 9В до 11В має майже лінійну залежність.

На рис.5 наведена теоретична та експериментальна залежність реактивної складової повного опору від напруги живлення. З графіка видно, що зі зростанням  $U_1$  від 8,5В до 12,5В ( $U_2=4 В$ ) реактивна складова збільшується в більш значній мірі, ніж від 12,5В до 14 В.

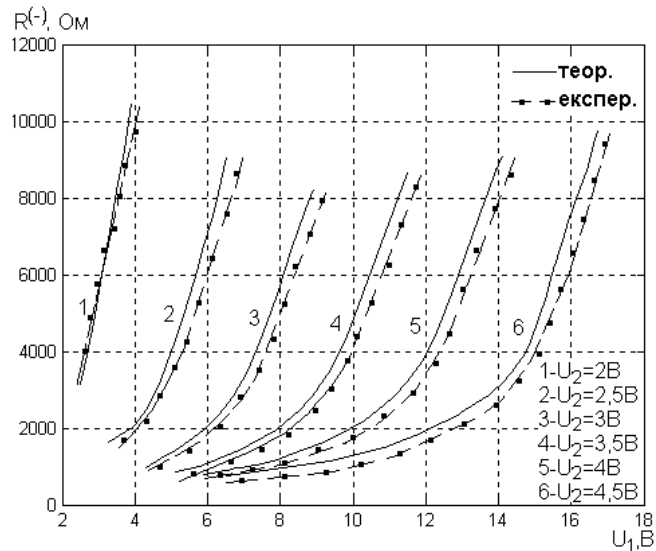


Рис.4. Теоретична та експериментальна залежність активної складової повного опору від напруги живлення  $U_1$

На рис.6. представлена залежність частоти генерації від напруги живлення при різній напрузі керування. З представлених графіків видно, що зі збільшенням напруги керування збільшується частотна область генерації. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги керування при різній напрузі живлення представлена на рис.7. При напрузі живлення 5,5 В залежність має майже лінійний характер. Тому значення 5,5 В для напруги живлення є оптимальним.

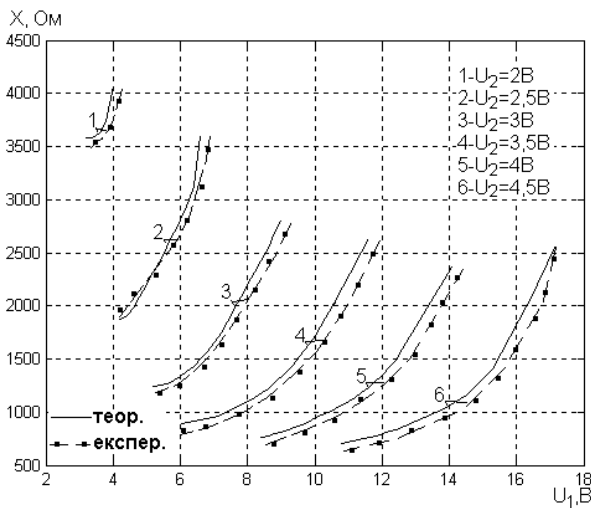


Рис.5. Теоретична та експериментальна залежність реактивної складової повного опору від напруги живлення  $U_1$

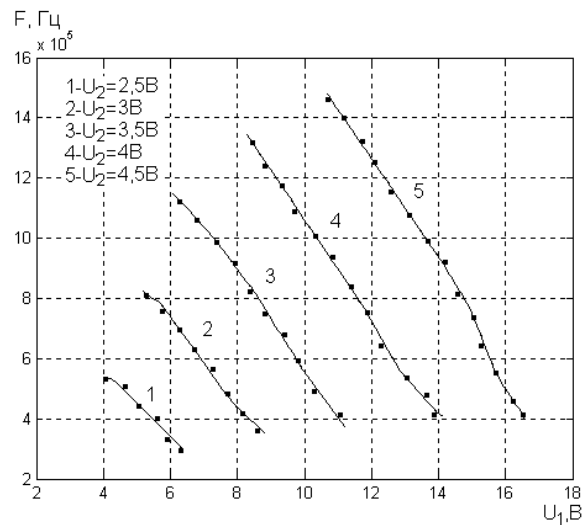


Рис.6. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення  $U_1$  при різних напругах керування

На рис.8 подана залежність частоти генерації від концентрації газу. Як видно з графіку, найкращу залежність для функції перетворення можна одержати, якщо напруга живлення дорівнює 5,5В. В якості газочутливого елемента був використаний резистивний сенсор фірми Figaro (Японія).

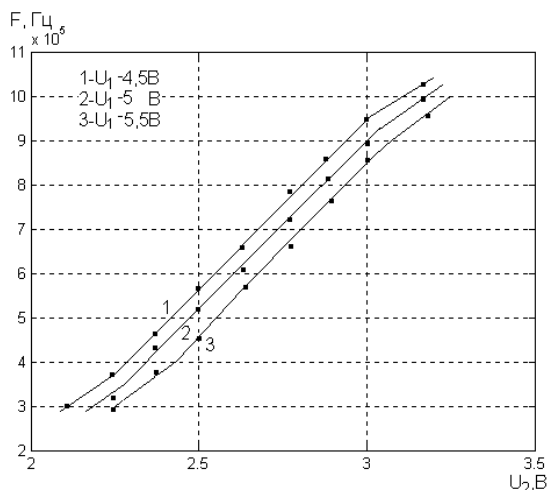


Рис.7. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги керування  $U_2$  при різних напругах живлення

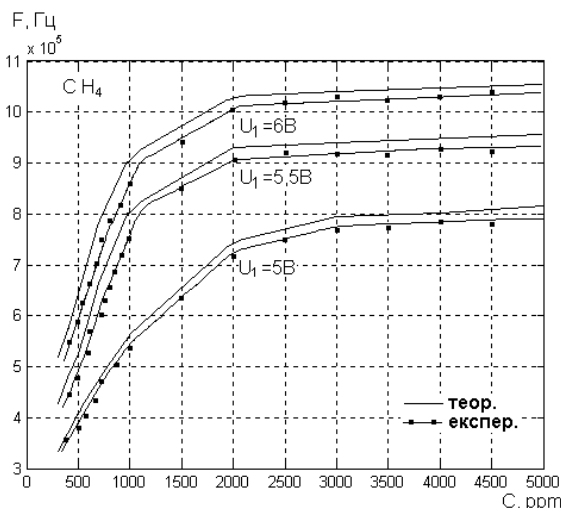


Рис.8. Теоретична та експериментальна залежність частоти генерації від концентрацій газу метану

На рис.9 та рис.10 наведені експериментальні залежності частоти генерацій від концентрацій газу пропану, які знімалися з використанням сенсорів типу АЧЕ виробництва України та фірми UST, Німеччина.

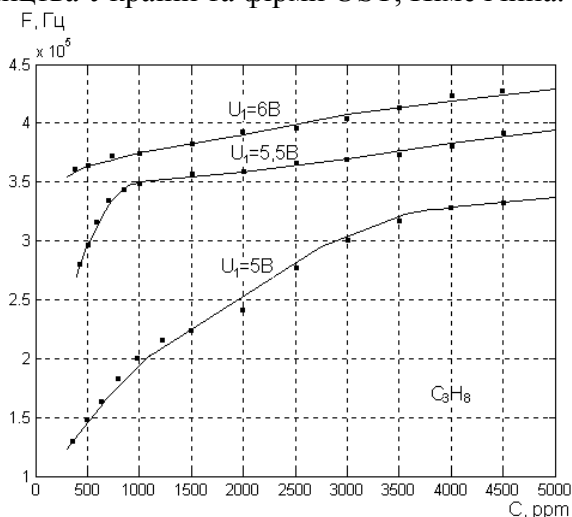


Рис.9. Експериментальна залежність частоти генерацій від концентрацій пропану (чутливий елемент фірми АЧЕ, Україна) при різних напругах живлення  $U_1$

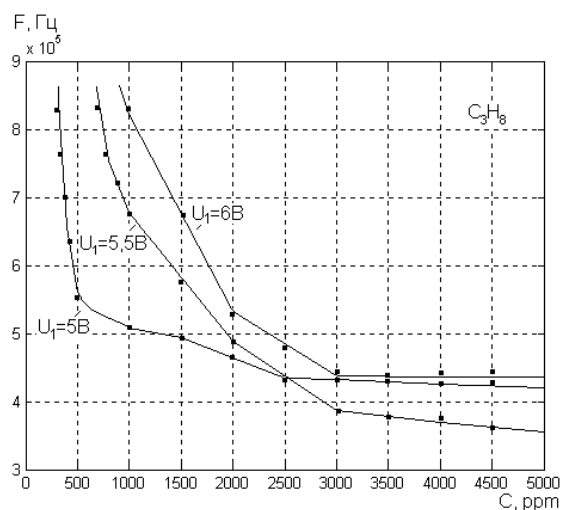


Рис.10. Експериментальна залежність частоти генерацій від концентрацій пропану (чутливий елемент фірми UST, Німеччина) при різних напругах живлення  $U_1$

Залежність частоти генерації від концентрацій газу визначається по контуру зворотного зв'язку згідно еквівалентної схеми (рис.3). Функція перетворення описується виразом

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4R_5^2 C C_{bx1} R_\Gamma (C)^2 C_{H\Gamma}^2 C_{bx2} (C_{bx1} + C_{bx2})}}{2R_5^2 C C_{bx1} R_\Gamma (C)^2 C_{H\Gamma}^2 C_{bx2}}}, \quad (2)$$

де  $A_1 = R_\Gamma (C)^2 C_{bx2} C_{H\Gamma}^2 + R_5^2 C_{H\Gamma} C_{bx1} C_{bx2} + C_{bx1} R_\Gamma (C)^2 C_{H\Gamma}^2 - R_5^2 C C_{bx1} C_{bx2}$ .

Графічна залежність функцій перетворення в порівнянні з експериментальним її значенням представлені на рис.10. Чутливість перетворювача визначається на основі виразу (2) та описується рівнянням

$$\begin{aligned}
S_C^F = & \frac{1}{8} \sqrt{2} \left( \left( 2C_{bx2} C_{H\Gamma}^2 R_{\Gamma}(C) \left( \frac{\partial R_{\Gamma}(C)}{\partial C} \right) + 2C_{bx1} C_{H\Gamma}^2 R_{\Gamma}(C) \left( \frac{\partial R_{H\Gamma}(C)}{\partial C} \right) + \right. \right. \\
& + \frac{1}{2} (2B_1 \times (2C_{bx2} C_{H\Gamma}^2 R_{\Gamma}(C) \left( \frac{\partial R_{\Gamma}(C)}{\partial C} \right) + 2C_{bx1} C_{H\Gamma}^2 R_{\Gamma}(C) \left( \frac{\partial R_{\Gamma}(C)}{\partial C} \right)) + \\
& \left. \left. + 8B_2 \times \left( \frac{\partial R_{\Gamma}(C)}{\partial C} \right) \right) \right) / \sqrt{B_1 + 4B_2} / (R_5^2 C C_{bx1} C_{bx2} C_{H\Gamma}^2 R_{\Gamma}(C)^2) - \\
& - \frac{2B_1 + \sqrt{B_1^2 + 4B_2} \left( \frac{\partial R_{\Gamma}(C)}{\partial C} \right)}{R_5^2 C C_{bx1} C_{bx2} C_{H\Gamma}^2 R_{\Gamma}(C)^3} \left/ \left( \pi \sqrt{\frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 + 4B_2}}{R_5^2 C C_{bx1} C_{bx2} C_{H\Gamma}^2 R_{\Gamma}(C)^2}} \right) \right., \quad (3)
\end{aligned}$$

де  $B_1 = R_{\Gamma}(C)^2 C_{bx2} C_{H\Gamma}^2 + R_5^2 C_{H\Gamma} C_{bx1} C_{bx2} + C_{bx1} R_{\Gamma}(C)^2 C_{H\Gamma}^2 - R_5^2 C C_{bx1} C_{bx2}$ ,  
 $B_2 = R_5^2 (C_{bx1} + C_{bx2}) C_{bx1} C_{bx2} C_{H\Gamma}^2 C R_{\Gamma}(C)^2$ .

Графік залежності чутливості від концентрації газу представлений на рис.11.

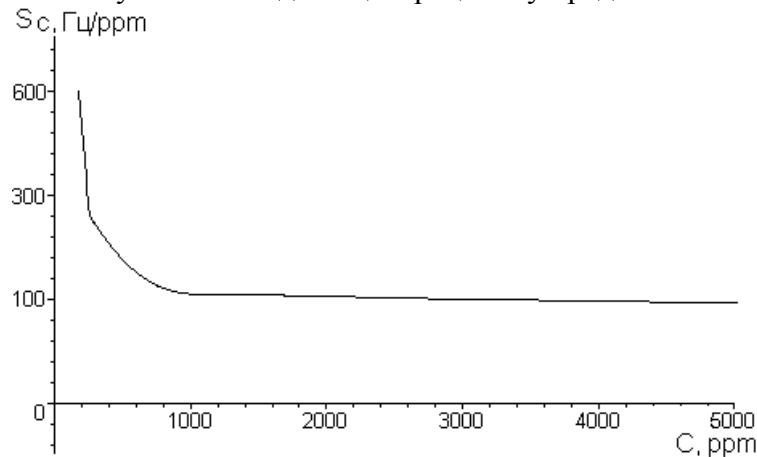


Рис.11. Залежність чутливості від концентрації газу

Згідно графіку найбільша чутливість пристрою лежить від 100 до 300 ррт та має значення 500 Гц/ррт, а при значеннях концентрації від 300 до 1000 ррт приймає значення 260 Гц/ррт. В діапазоні від 1000 до 5000 ррт складає 115 Гц/ррт.

### Висновки

Показана можливість прямого перетворення концентрації газу у частотний сигнал на основі гібридної інтегральної схеми, яка складається з трьох біполярних транзисторів, один з яких разом з RC-колом реалізує активний індуктивний елемент коливально-го контуру автогенераторного перетворювача. Отримані аналітичні залежності функції перетворення та рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що чутливість перетворювача складає 100-600 Гц/ррт.

### Література

- 1.Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2000. – 303 с.
- 2.Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1999. – 275 с.