

УДК 621.382

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ НА ОСНОВІ  
ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З NDR ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ШТАМІВ БАКТЕРІЇ  
*HELICOBACTER PYLORI***

DOI 10.36994/2707-4110-2019-1-22-09

**Осадчук О. В.**, д.т.н., проф., Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. osadchuk.av69@gmail.com

**Осадчук Н. І.**, к.мед.н., доц., Вінницький національний медичний університет ім.М.І.Пирогова, Вінниця, Україна. osadchuk.n70@gmail.com

**Осадчук Я. О.**, к.т.н., доц., Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. osadchuk.j93@gmail.com

**Анотація.** В статті розглянуто радіовимірювальний перетворювач концентрації газу для діагностики штамів бактерії *Helicobacter Pylori*. Одним із перспективних напрямків при побудові перетворювачів концентрації газу для дихальної діагностики є використання частотних перетворювачів концентрації газу на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференційним опором (NDR). Даний тип перетворювачів дозволяє розв'язати задачу використання аналогово-цифрових перетворювачів, оскільки реалізовує метод перетворення «інформативний сигнал — частота», який є одним з найкращих для подальшої обробки на комп'ютері. Проведені теоретичні та практичні дослідження показали, що використовуючи реактивні властивості напівпровідникових приладів та транзисторні структури, в яких існує від'ємний диференційний опір, можна значно підвищити чутливість та точність вимірювання концентрації газу, зокрема  $\text{NH}_3$ . Авторами запропонований та досліджений радіовимірювальний перетворювач концентрації газу який побудований на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором та газочутливим елементом до  $\text{NH}_3$ . При зміні концентрації газу змінюється провідність чутливого елемента який адсорбує молекули  $\text{NH}_3$ , що в свою чергу змінює активну та реактивну складові повного опору транзисторної структури. Реактивна складова повного опору транзисторної структури має ємнісний характер. Ця ємність входить в склад загальної ємності, що виникає на електродах стік двозатворного МДН-транзистора — колектор біполярного транзистора, яка разом з індуктивністю  $L$  утворюють резонансне коливальне коло. Розроблена динамічна математична модель частотного перетворювача концентрації газу методом змінних станів. Динамічна модель автогенераторного вторинного перетворювача концентрації газу дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від зміни концентрації газу в будь-який момент часу. Отримано аналітичні вирази функції перетворення і рівняння

чутливості. Чутливість розробленого пристрою для діагностики штамів бактерії *Helicobacter Pylori* складає від 2,1 кГц/ррт до 3,4 кГц/ррт.

**Ключові слова:** радіовимірювальний частотний перетворювач, від'ємний диференційний опір, реактивні властивості, концентрація газу, *Helicobacter Pylori*.

## **RADIOMEASURING GAS CONCENTRATION TRANSDUCER BASED ON TRANSISTOR STRUCTURE WITH NDR FOR THE DIAGNOSIS OF STRAINS OF THE BACTERIUM HELICOBACTER PYLORI**

**Alexander Osadchuk**, Dr.habil., Prof., Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, osadchuk.av69@gmail.com

**Neonila Osadchuk**, Ph.D., Aass. Prof., National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine. osadchuk.n70@gmail.com

**Jaroslav Osadchuk**, Ph.D., Aass. Prof., Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. osadchuk.j93@gmail.com

**Abstract.** The article discusses a radiomeasuring gas concentration transducer for the diagnosis of strains of the bacterium *Helicobacter pylori*. One of the promising directions in the construction of gas concentration transducers for respiratory diagnostics is the use of gas concentration frequency transducers based on the reactive properties of transistor structures with negative differential resistance (NDR). This type of transducers allows you to solve the problem of using analog-to-digital converters, because it implements the method of converting «informative signal — frequency», which is one of the best for further processing on a computer. Theoretical and practical studies have shown that using the reactive properties of semiconductor devices and transistor structures in which there is a negative differential resistance, it is possible to significantly increase the sensitivity and accuracy of measuring gas concentration, in particular  $\text{NH}_3$ . The authors proposed and studied a gas concentration measuring transducer, which is built on the basis of a transistor structure with negative differential resistance and a gas-sensitive element to  $\text{NH}_3$ . With a change in gas concentration, the conductivity of the sensitive element changes, which adsorbs  $\text{NH}_3$  molecules, which in turn changes the active and reactive components of the impedance of the transistors structure. The reactive component of the impedance of the transistors structure is capacitive in nature. This capacitance is part of the total capacitance that occurs at the electrodes of the drain of a double-gate MOS transistor and collector of a bipolar transistor, which together with the inductance  $L$  form a resonant oscillatory circuit. A dynamic mathematical model of the frequency transducer of gas concentration by the method of variable states is developed. The dynamic model of the self-generating secondary transducer of gas concentration allows you to determine the value of the frequency of the output signal depending on the change in gas concentration at any time. Analytical expressions of the transformation function and sensitivity equations are obtained. The sensitivity of the developed device for the diagnosis of strains of the bacterium *Helicobacter pylori* ranges from 2.1 kHz/ppm to 3.4 kHz/ppm.

**Keywords:** radiomeasuring frequency transducer, negative differential resistance, reactive properties, gas concentration, *Helicobacter pylori*.

## **Вступ**

Одним із напрямків підвищення ефективності діагностування різних захворювань з використанням новітніх методів та засобів, а також більш повного і різнобічного аналізу ознак є актуальним напрямом сучасної медицини. Неінвазивний метод аналізу повітря, що видихається пацієнтом, останнім часом викликає підвищений інтерес. На сьогоднішній день визначення різних штамів бактерії *Helicobacter pylori* (*H.pylori*) набуло великої значимості у зв'язку з розповсюдженістю та її ролі у розвитку багатьох серйозних шлунково-кишкових захворювань [1–3].

У медичній практиці використовуються сучасні засоби діагностики хелікобактерної інфекції і застосовується нова протиінфекційна стратегія лікування гастродуоденальних захворювань [4]. В даний час із методів дихальної діагностики *H.pylori* переважає неінвазивний  $C^{13}$ -уреазний дихальний тест, який має високу діагностичну достовірність. Альтернативним методом дихальної діагностики є метод заснований на визначенні аміаку ( $NH_3$ ) в повітрі, що видихається альвеолами і концентрацією аміаку, що надходить зі шлунка, при оцінці сумарної концентрації аміаку [5].

## **Теоретичні та експериментальні дослідження**

Перспективним напрямком при побудові перетворювачів концентрації газу для дихальної діагностики є використання частотних перетворювачів концентрації газу на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференційним опором (NDR) [6, 7]. Даний тип перетворювачів дозволяє розв'язати задачу використання аналогово-цифрових перетворювачів, оскільки реалізовує метод перетворення «інформативний сигнал — частота», який є одним з найкращих для подальшої обробки на комп'ютері [8]. Проведені теоретичні та практичні дослідження показали, що використовуючи реактивні властивості напівпровідникових приладів та транзисторні структури, в яких існує від'ємний диференційний опір, можна значно підвищити чутливість та точність вимірювання концентрації газу, зокрема  $NH_3$  [9–11].

В ході аналізу оптимального варіанта конструкції вторинного перетворювача концентрації газу, було зроблено висновок про доцільність використання частотного методу перетворення інформації, що дозволить підвищити чутливість вимірювання контрольованого параметра, зокрема  $NH_3$ , в діагностичних медичних систем, а також забезпечити високу завадостійкість інформативного сигналу.

Принципово автогенераторні транзисторні структури з від'ємний диференційним опором являють собою транзисторний аналог негатрона, ВАХ яких має спадаючу ділянку, яка відповідає від'ємному диференційному опору, який забезпечується внутрішнім зворотним зв'язком і слугує компенсацією втрат енергії на активних опорах схеми. Комплексний опір такої структури, в залежності від вигляду його вольт-амперної характеристики, має ємнісний або індуктивний характер, а величина залежить від прикладеної до її входу напруги [12]. При з'єднанні такої структури з індуктивністю, утворюється резонансний коливальний контур. Якщо величина падіння напруги і величини комплексного опору транзисторної структури залежить від величини вимірювального параметра, то за

зміною частоти коливань такого автегенератора можна визначати величину вимірюваної фізичної величини.

На рис. 1 подана схема вторинного перетворювача концентрації газу з чутливим елементом до  $\text{NH}_3$  на основі Metal-Oxide (MOX) газочутливого елемента GGS 4430T фірми UST Umwelt Sensor Technik GmbH. Знаходження оптимальної робочої точки живлення такої схеми здійснюється за допомогою двох джерел постійної напруги: напруги живлення  $U_2$  і напруги керування  $U_1$  (рис. 1).

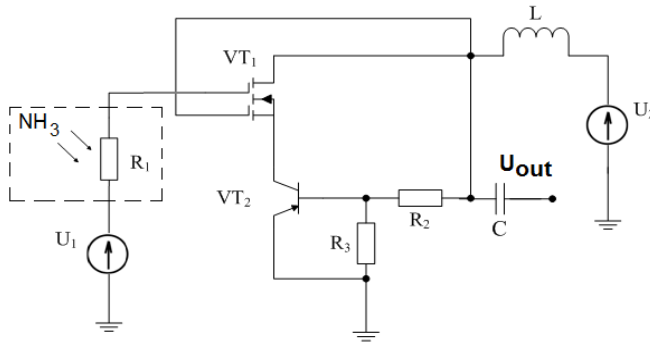


Рис. 1. Частотний перетворювач газу на основі транзисторної структури з NDR для діагностики штамів бактерії *Helicobacter pylori*

При зміні концентрації газу змінюється провідність чутливого елемента який адсорбує молекули  $\text{NH}_3$ , що в свою чергу змінює активну та реактивну складові повного опору транзисторної структури. Реактивна складова повного опору транзисторної структури має ємнісний характер. Ця ємність входить в склад загальної ємності, що виникає на електродах стік двозатворного МДН-транзистора — колектор біполярного транзистора, яка разом з індуктивністю  $L$  утворюють резонансне коливальне коло, що, з огляду на вищевказане, має залежну від концентрації газу резонансну частоту коливань. На рис. 2 представлено сімейство експериментальних статичних та динамічних вольт-амперних характеристик радіовимірювального перетворювача концентрації газу.

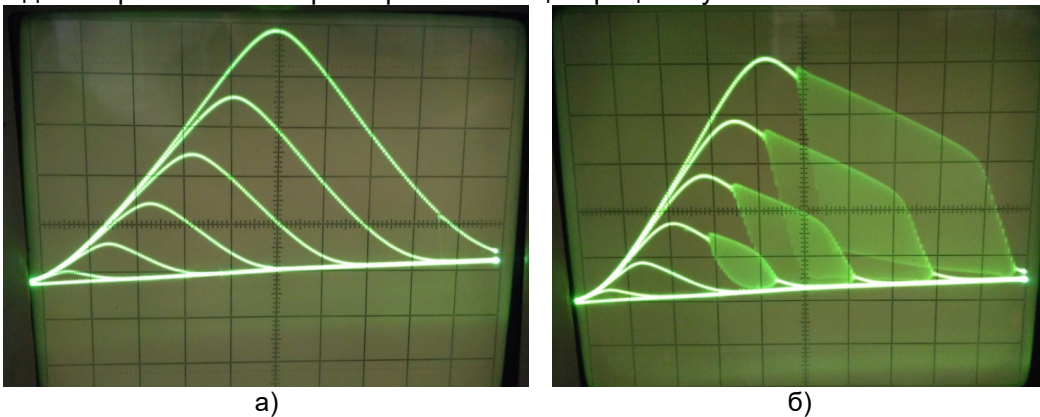


Рис. 2. Статична (а) та динамічна (б) ВАХ радіовимірювального перетворювача концентрації газу (по вертикальній вісі одна поділка — 5мА, а по горизонтальній вісі — 2В)

Для створення математичної моделі вторинного перетворювача концентрації газу на рис. 3 наведено нелінійну еквівалентну схему радіовимірювального частотного перетворювача.

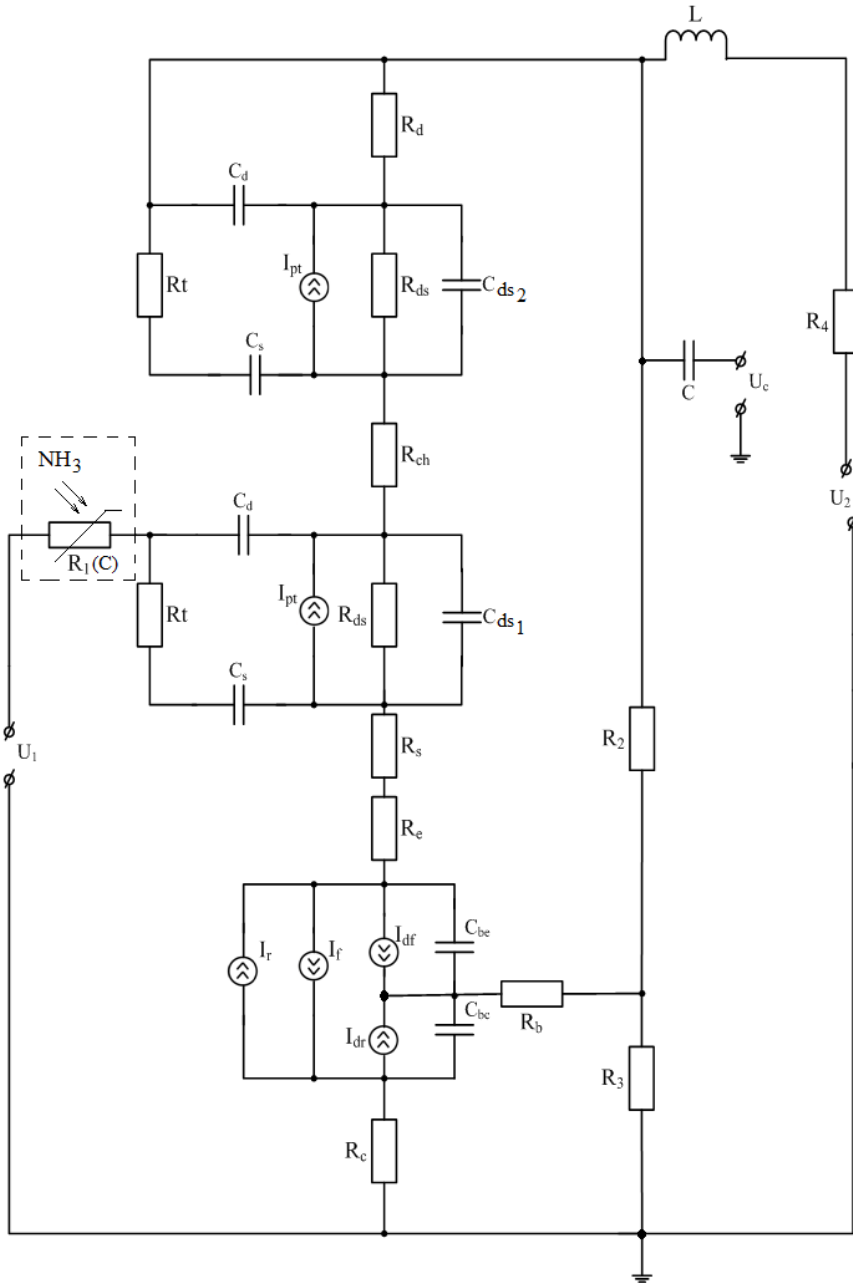


Рис. 3. Еквівалентна схема радіовимірювального частотного перетворювача концентрації аміаку

На нелінійній еквівалентній схемі радіовимірювального частотного перетворювача концентрації аміаку, елементи позначені наступним чином:  $U_1, U_2$  — джерела живлення;  $L$  — індуктивність;  $R_1(C)$  — чутливий до газу МОХ елемент;  $R_4$  — внутрішні опори джерел живлення;  $R_2$  і  $R_3$  — навантажувальні опори переходів стік-витік і база-колектор транзисторів;  $R_{ds}, R_d, R_s, R_e, R_c, R_b$  — об'ємні опори каналу, стоку, витоку польового транзистора, емітера, колектора і бази біполярного транзистора;  $C_e, C_c$  — ємності емітерного і колекторного переходів біполярного транзистора;  $C_s, C_d, C_{ds}$  — ємності затвор-витік, затвор-стік, та ємність польового транзистора;  $I_f, I_r$  — прямий і зворотній струм біполярного транзистора;  $I_{dr}, I_{df}$  — струми внутрішніх переходів база-колектор та база-емітер;  $I_{pt}$  — струм каналу польового транзистора.

Для побудови математичної моделі радіовимірювального частотного перетворювача концентрації газу застосуємо метод змінних стану, який дозволяє визначити значення напруг і струмів елементів кола в кожний момент часу. Згідно з методом змінних станів, всі ємності представлені у вигляді незалежних джерел напруги, а індуктивність — джерела струму [13], а також зроблено наступне спрощення:  $I_{bt} = (I_f - I_r)/QB$ , де  $QB$  — коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора.

Обравши напрямки обходу контурів і позначивши відповідні струми, запишемо систему рівнянь за законами Кірхгофа. Отриману систему рівнянь використаємо для аналізу схеми методом змінних станів:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_L = U_1 - (i_{R_2}(R_2 + R_{Cc}) + i_{R_3}R_3 - i_L R_4); \\ i_{R_3} = i_{R_2} - i_{R_b}; \\ i_{R_{ds}} = -U_{Cds}/R_{ds}; \\ i_{c_d} = (U_{c_s} - U_{Cds} - U_{c_d})/R_t; \\ i_{R_d} = U_{Cds}/R_d; \\ i_{R_2} = i_{c_d} + i_{R_d} + i_L; \\ i_{R_b} = (-U_{c_c} - i_{R_c}R_c - i_{R_3}R_3)/R_b; \\ i_{R_c} = (-R_1(C)(i_{c_d} + i_{c_s}) - i_{R_e}(R_e + R_s) - (U_2 + U_{c_s} + U_{c_c} + U_{c_e}))/R_c; \\ i_{R_1} = i_{c_d} + i_{c_s}; \\ i_{c_s} = -I_{pt} - i_{R_{ds}} + i_{c_{ds}} + i_{R_e}; \\ i_{c_{ds}} = i_{R_d} + I_{pt} - i_{c_d} + i_{R_{ds}}; \\ i_{c_c} = i_{R_c} + I_{bt} - I_{dr}; \\ i_{c_e} = i_{R_e} + I_{bt} + I_{df}; \\ i_{R_e} = i_{R_c} - i_{R_b}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Вважаючи заданими відповідні значення напруг на ємностях та струм через індуктивність, розв'яжемо систему рівнянь (1) відносно таких величин:  $U_L$ ,  $i_{c_d}$ ,  $i_{c_s}$ ,  $i_{c_{ds}}$ ,  $i_{c_c}$ ,  $i_{c_e}$ , зробивши такі підстановки:

$$A_1 = \frac{-U_{Cds} + U_{C_s} - U_{C_d}}{R_t} + I_{pt} + \frac{U_{C_d}}{R_d} - \frac{U_{Cds}}{R_{ds}}; \quad A_2 = I_{bt} + I_{df}; \quad A_3 = U_2 + U_{C_s} + U_{C_c} + U_{C_e};$$

$$A_4 = i_{c_d}; \quad A_5 = -R_1(C)A_4 + I_{pt} - A_1 - \frac{U_{Cds}}{R_{ds}} - A_3; \quad A_6 = R_e + R_s + R_1(C);$$

$$A_7 = 2U_{Cds} + U_{C_e} + U_{C_d} + U_{C_c}; \quad A_8 = \left( \frac{U_{C_s} - U_{Cds} - U_{C_d}}{R_t} + \frac{U_{C_d}}{R_d} + i_L \right) (R_2 + R_3);$$

$$A_9 = 1 - A_6 - \frac{A_6}{R_b} (2R_2 + R_3); \quad A_{10} = A_5 + A_6 A_7 + A_6 A_8 + \frac{A_6 U_{C_c} (2R_2 + R_3)}{R_b};$$

$$A_{11} = \frac{A_6 (2R_2 + R_3)}{R_b}; \quad A_{12} = \left( A_4 + \frac{U_{C_d}}{R_d} \right) (R_2 + R_3); \quad A_{13} = U_{C_c} A_9 + A_{10};$$

$$A_{14} = -A_7 A_9 - A_{10} + A_4 A_9 - \frac{U_{C_d}}{R_d} A_9; \quad A_{15} = A_9 (2R_s + R_e); \quad A_{16} = A_{11} R_3 + A_9 R_3;$$

$$A_{17} = \frac{-U_{C_c} A_9 - A_{10} - 2A_{14} R_b - A_{15} R_b (I_{bt} + I_{pt}) + A_5 A_1 R_b + A_{15} R_b I_{dr} + \frac{A_{15} R_b U_{Cds}}{R_{ds}}}{2A_{16} R_b + A_{11} R_3 + A_9 R_3}.$$

$$\begin{cases} i_{c_d} = A_4; \\ i_{c_c} = \frac{A_{10} + A_{11} R_3 A_{17}}{A_9 R_C}; \\ i_{c_e} = \frac{A_{14} + A_{16} A_{17}}{A_{15}} + I_{bt} - I_{dr}; \\ i_{c_s} = \frac{A_{14} + A_{16} A_{17}}{A_{15}} + I_{pt} - A_1 - \frac{U_{Cds}}{R_{ds}}; \\ i_{c_{ds}} = A_1; \\ U_L = U_1 - (A_{12} + i_L (R_2 + R_3 + R_4)) + A_{17}. \end{cases} \quad (2)$$

Оскільки напруги і струми схеми частотного перетворювача концентрації газу змінюються у часі, то, враховуючи, що струм ємності і напруга на індуктивності описуються виразами:  $i_c = C \frac{dU_c}{dt}$ ,  $U_L = L \frac{di_L}{dt}$ . Якщо врахувати, що кожне миттєве значення напруги і струму в еквівалентній схемі є функцією часу, то ліві частини рівнянь ми можемо записати у вигляді диференціальних рівнянь першого порядку і систему (2) переписемо наступним чином:

$$\left\{ \begin{aligned}
 C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} &= \frac{U_{C_s}(t) - U_{Cds}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t}; \\
 C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} &= \frac{U_{C_e}(t) - U_{Cds}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t} + I_{bt} - I_{dr}; \\
 C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} &= A_1 + I_{bt} - I_{dr}; \\
 C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} &= -I_{pt} - \frac{U_{Cds}(t)}{R_{ds}} + A_3; \\
 L \frac{di_L(t)}{dt} &= U_2 - i_L(t) \cdot R_4 - \frac{U_{C_e}(t) + U_{C_c}(t) + U_{C_s}(t)}{R_e + R_s}; \\
 C_{eqv}(t) \frac{dU_{Cds}(t)}{dt} &= \frac{U_{C_d}(t)}{R_d} + I_{pt} - \frac{U_{C_s}(t) - U_{Cds}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t} + \frac{U_{Cds}(t)}{R_{ds}}.
 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

З огляду на те, що система рівнянь (3) містить в собі доданки, які описують нелінійні елементи (джерела струму), то система є нелінійною. Нелінійні елементи схеми описують струми нелінійних внутрішніх джерел елементів схеми.

Динамічна модель автогенераторного вторинного перетворювача концентрації газу (3) дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від зміни концентрації газу в будь-який момент часу. Перевірка розробленої математичної моделі, проведена в середовищі Maple 13 [14], дозволяє переконатися в її адекватності. Розрахунок показує, що при наявності певного рівня концентрації газу на виході схеми виникають синусоїдальні коливання і їх частота залежить від рівня концентрації газу (NH<sub>3</sub>). Так, на рис. 4 представлено графіки коливань на виході частотного перетворювача при трьох значеннях концентрації газу (NH<sub>3</sub>).

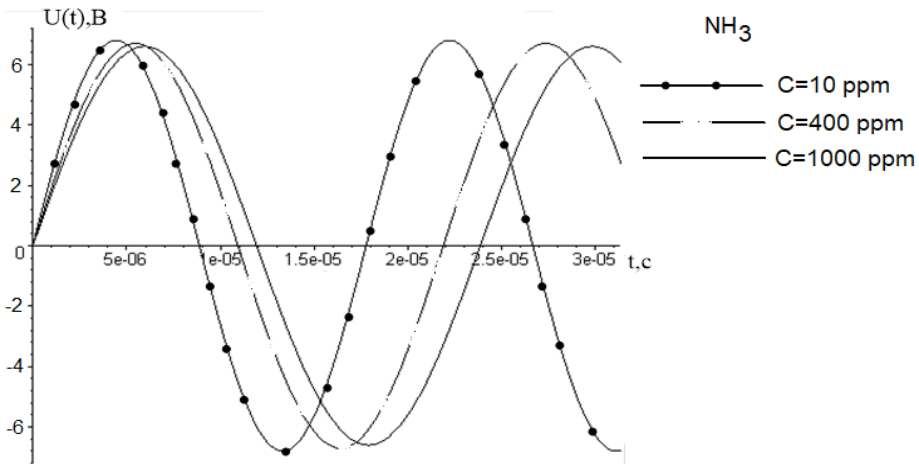


Рис. 4. Зміна вихідного сигналу частотного перетворювача від зміни концентрації аміаку



Для проведення експериментальної перевірки математичної моделі (система рівнянь (3), була розроблена гібридна інтегральна схема на основі двозатворного МДН-транзистора ВФ998 і біполярного транзистора ВС857.

Для того, щоб виявити залежність вихідного параметра частотного перетворювача концентрації газу від величини вимірюваного параметра, а також для адекватного калібрування приладу використовують функцію перетворення. Виходячи з умов стійкості Ляпунова [15], на основі умови резонансу коливального контуру, частота вихідного сигналу частотного перетворювача концентрації газу буде визначатись наступним виразом:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 + 4L_1 C_{GD} (C_{CE} R_1(C) R_4)^2}}{2L_1 C_{GD} (R_1(C) R_4 C_{CE})^2}}, \quad (4)$$

де  $B_1 = L_1 C_{GD} - (C_{CE} R_1(C) R_4)^2 - C_{GD} C_{CE} R_1^2(C) R_4^2$ ,  $L$  — зовнішня індуктивність,  $C_{CE}$  — прохідна ємність колектор-емітер VT2,  $C_{GD}$  — ємність затвор-стік польового транзистора VT1.

Взявши похідну функції перетворення за концентрацією газу, отримаємо рівняння чутливості для даного вимірювального перетворювача, яке аналітично описується такою формулою:

$$\begin{aligned} S_C^{F_0} = & 0.0562 \left( \frac{1}{B_2} \left( 2C_{ce}^2 R_1(C) R_4^2 \left( \frac{\partial R_1(C)}{\partial C} \right) - 2C_{ce}^2 R_1^2(C) R_4 - 2C_{gd} C_{ce} R_1(C) R_4^2 \left( \frac{\partial R_1(C)}{\partial C} \right) - \right. \right. \\ & - 2C_{gd} C_{ce} R_1^2(C) R_4 + \frac{1}{2} \left( -2C_{ce}^2 R_1(C) R_4^2 \left( \frac{\partial R_1(C)}{\partial C} \right) - 2C_{ce}^2 R_1^2(C) R_4 - \right. \\ & \left. \left. - 2C_{gd} C_{ce} R_1(C) R_4^2 \left( \frac{\partial R_1(C)}{\partial C} \right) - 2C_{gd} C_{ce} R_1^2(C) R_4 + \right. \right. \\ & \left. \left. + 8L_1 C_{gd} C_{ce}^2 R_1(C) R_4^2 \times \left( \frac{\partial R_1(C)}{\partial C} \right) + 8L_1 C_{gd} C_{ce}^2 R_1^2(C) R_4 \right) / B_3 \right) - \\ & - \frac{1}{B_2} \left( 2(L_1 C_{gd} - C_{ce}^2 R_1^2(C) R_4^2 - C_{gd} C_{ce} R_1^2(C) R_4^2 + B_3 \left( \frac{\partial R_1(C)}{\partial C} \right) \right) - \\ & - \frac{1}{B_2} \left( 2(L_1 C_{gd} - C_{ce}^2 R_1^2(C) R_4^2 - C_{gd} C_{ce} R_1^2(C) R_4^2 + B_3 - \right) \left. \right) \left. \right) / \\ & \left( \frac{1}{B_2} (L_1 C_{gd} - C_{ce}^2 R_1^2(C) R_4^2 - C_{gd} C_{ce} R_1^2(C) R_4^2 + B_3) \right)^{1/2}, \quad (5) \end{aligned}$$

де  $B_2 = 2L_1 C_{GD} (R_1(C) R_4 C_{CE})^2$ ,  $B_3 = \sqrt{B_1 + 4L_1 C_{GD} (C_{CE} R_1(C) R_4)^2}$ .

Виходячи з виразу (4) отримали графік залежності частоти генерації схеми в залежності від величини концентрації газу, який представлено на рис. 5.

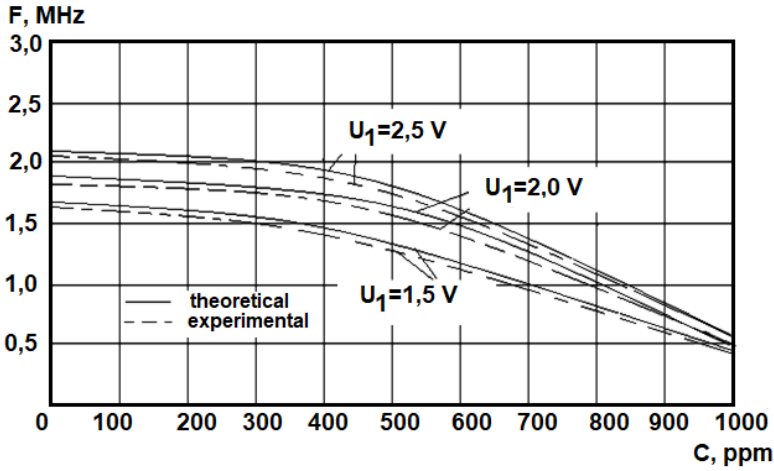


Рис. 5. Залежність частоти генерації від зміни концентрації  $\text{NH}_3$  при різних значеннях напруги керування

З рис. 5 видно, що при збільшенні напруги керування частота генерації частотного перетворювача концентрації газу зростає на всіх діапазонах вимірювання концентрації аміаку.

На основі отриманого аналітичного виразу (5) розраховано залежність чутливості перетворювача концентрації газу на всьому діапазоні вимірюваного параметра (рис. 6).

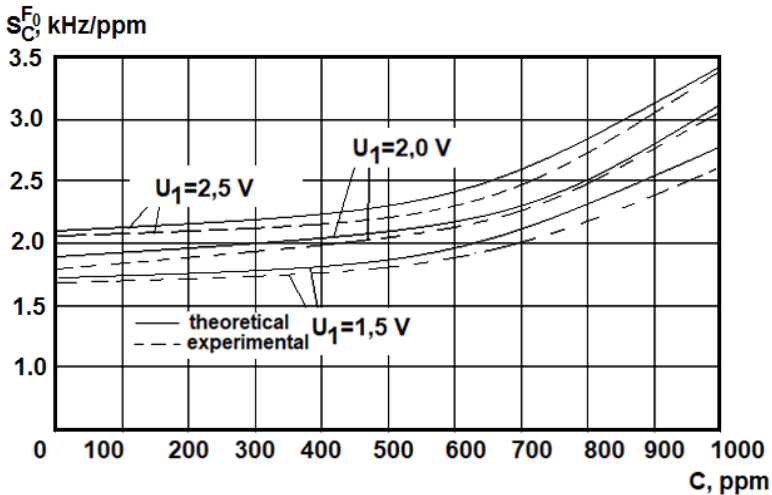


Рис. 6. Залежність чутливості частотного перетворювача при різних значеннях напруги керування

Із рис. 5 видно, що частота пропорційно зменшується при збільшенні концентрації аміаку, так частота приймає значення від 2,12 МГц до 0,53 МГц при зміні

концентрації  $\text{NH}_3$  від 0 до 1000 ppm. Чутливість розробленого частотного перетворювача концентрації газу складає від 2,1 кГц/ppm до 3,4 кГц/ppm. Адекватність розроблених моделей в порівнянні з експериментом визначається у вигляді відносної похибки і не перевищує  $\pm 2,5\%$ .

### Висновок

Розроблено частотний перетворювач концентрації газу для діагностики штамів бактерії *Helicobacter pylori*, який побудований на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором з чутливим елементом до  $\text{NH}_3$ . Розроблена динамічна математична модель частотного перетворювача концентрації газу методом змінних станів, яка дозволяє визначити значення напруги або струму в заданий момент часу при зміні концентрації аміаку в діапазоні від 0 до 1000 ppm. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали зміну вихідної частоти від 2,12 МГц до 0,53 МГц при зміні концентрації  $\text{NH}_3$  від 0 до 1000 ppm. Чутливість розробленого пристрою для діагностики штамів бактерії *Helicobacter Pylori* від 2,1 кГц/ppm до 3,4 кГц/ppm.

### Література

1. Лукаш С.И. Проблемы диагностики некоторых заболеваний в выдыхаемом воздухе // Компьютерные инструменты, сети и системы. 2010, № 9. — С. 62–71.
2. Методы диагностики *Helicobacter pylori*: учебное пособие / И. Г. Акопян, Н. В. Барышникова, Т. М. Григорян, Ю. С. Евстратова, А. В. Козлов, И. Ю. Мельникова и др. Под ред. Козлова В.П. — СПб.: «Издательство Диалект», 2008. — 88 с.
3. Хомерики С.Г., Касьяненко В.И. Лабораторная диагностика инфекции *Helicobacter pylori*. — СПб.: ООО АМА, 2011, — 110 с.
4. Семенова Н.В., Шубина Н.А. Устойчивость к лечению инфекции *Helicobacter pylori*. Новые возможности решения задачи с использованием масс-спектрометрического метода // Биомедицинская химия, 2005, т.51, № 6, — С. 679–687.
5. Барышникова Н.В. Актуальные проблемы диагностики *Helicobacter pylori* / Терапевтическая гастроэнтерология. № 2, 2009. — С. 50–56.
6. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities//Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 21–23 May 2015. Omsk. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167
7. Oleksandr V. Osadchuk, Volodymyr S. Osadchuk, Iaroslav O. Osadchuk, 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 (August 7, 2017); doi:10.1117/12.2280892
8. Novitsky P.V., Knoring V.G., Gutnikov V.S. Digital instruments with frequency sensors. — Leningrad: Energy, 1970. — 424 p.
9. V.S. Osadchuk, A.V. Osadchuk, and Y.A. Yushchenko, «Radiomeasuring thermal flowmeter of gas on the basis of transistor structure with negative resistance», Elektronika ir Elektrotechnika, — Kaunas: Technologija. vol. 84, № 4, pp. 89–93, 2008.

10. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Вплив газореактивного ефекту первинних напівпровідникових сенсорів газу на вихідну частоту автогенераторних перетворювачів // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 30 (69). № 3. Частина 2., 2019. — С. 223–227.

11. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Математична модель газореактивного ефекту в напівпровідникових сенсорах газу // Вісник Хмельницького Національного університету. Серія: Технічні науки. Хмельницький, 2019, № 2 (271). — С. 160–166. DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-160-166

12. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. The microelectronic transducers of pressure with the frequency // Elektronika ir Elektrotechnika. — Kaunas: Technologija, 2012. — № 5(121). — pp.105–108.

13. Чернышова Т.И. Моделирование электронных схем / Т. И. Чернышова, Н. Г. Чернышов. — Тамбов : ТГТУ, 2010. — 80 с.

14. Maple User Manual. Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc. 2014. — 354 p.

15. Ла-Салль Ж. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова / Ж. Ла-Салль, С. Левшец — М. : Мир, 1964. — 168 с.

## References

1. Lukash S.I. Problems of diagnosing certain diseases in exhaled air // Computer tools, networks and systems. 2010, No. 9. pp. 62–71.

2. Diagnostic methods of Helicobacter pylori: a training manual / I.G. Akopyan, N.V. Baryshnikova, T.M. Grigoryan, Yu.S. Evstratova, A.V. Kozlov, I.Yu. Melnikova, etc. ed. Kozlova V.P. — St. Petersburg: «Publishing House Dialect, 2008. — 88 p.

3. Khomeriki S.G., Kasyanenko V.I. Laboratory diagnosis of Helicobacter pylori infection. — St. Petersburg: LLC AMA, 2011, — 110 p.

4. Semenova N.V., Shubina N.A. Resistance to treatment of Helicobacter pylori infection. New possibilities for solving the problem using the mass spectrometric method // Biomedical Chemistry, 2005, v.51, No. 6, pp. 679–687.

5. Baryshnikova N.V. Actual problems of the diagnosis of Helicobacter pylori / Therapeutic gastroenterology. No. 2, 2009. pp. 50–56.

6. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities//Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 21–23 May 2015. Omsk. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167

7. Oleksandr V. Osadchuk, Volodymyr S. Osadchuk, Iaroslav O. Osadchuk, 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 (August 7, 2017); doi:10.1117/12.2280892

8. Novitsky P.V., Knoring V.G., Gutnikov V.S. Digital instruments with frequency sensors. — Leningrad: Energy, 1970. — 424 p.

9. V.S. Osadchuk, A.V. Osadchuk, and Y.A. Yushchenko, «Radiomeasuring thermal flowmeter of gas on the basis of transistor structure with negative resistance,» Elektronika ir Elektrotechnika, — Kaunas: Technologija. vol. 84, № 4, pp. 89–93, 2008.

10. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. By inflating the gas-reactive effect of the first primary sensors to the gas at the higher frequency of the auto-oscillating overvoltage // General notes of the Tavria National University. V.I. Vernadsky. Seriya: Technical sciences. Volume 30 (69). No. 3. Chastina 2., 2019. — pp. 223–227.
11. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I. O. A mathematical model of a gas-reactive effect in gas sensors // News of the Khmelnytsky National University. Seriya: Technical sciences. Khmelnytsky, 2019, No. 2 (271). — pp. 160–166. DOI 10.31891 / 2307-5732-2019-271-2-160–166
12. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. The microelectronic transducers of pressure with the frequency // Elektronika ir Elektrotechnika. — Kaunas: Technologija, 2012. — № 5(121). — pp.105–108.
13. Chernyshova T.I. Modeling of electronic circuits / T.I. Chernyshova, N.G. Chernyshov. — Tambov: TSTU, 2010. — 80 p.
14. Maple User Manual. Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc. 2014. — 354 p.
15. La-Sall J. Investigation of stability by the direct Lyapunov method / J. La-Sall, S. Levshets — M.: Mir, 1964. — 168 p.