

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621. 38

О. В. Осадчук, д-р. техн. наук, проф.;  
В. П. Деундяк;  
М. В. Деундяк, асп.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИКО-ЧАСТОТНИХ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ

*Розроблено математичну модель сенсора температури на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Отримано аналітичний вираз для повного опору та теоретичні залежності реактивної та активної складових повного комплексного опору температурних сенсорів на основі цих структур. Проведено експериментальне дослідження основних характеристик сенсорів температури.*

### Вступ

Проблема створення системи уніфікованих сенсорів температури з високими метрологічними характеристиками та вихідним сигналом, який можна перетворити у форму коду з незначними похибками залишається досить актуальною, оскільки відомі сенсори температури мають низку недоліків (низька точність, мала швидкодія, складність проектування). Використання реактивних властивостей транзисторних структур для перетворення напруги в частоту є одним із найефективніших шляхів розв'язання цієї проблеми.

Метою роботи є створення та дослідження сенсорів температури, дія яких ґрунтується на функціональній залежності імпедансу напівпровідникових приладів від однієї з найпоширеніших неелектричних величин — температури.

### Побудова математичної моделі температурного сенсора на основі структури, що складається з пари біполярних транзисторів

Ефективно вирішити проблему дистанційного вимірювання температури дозволяє пристрій показаний на рис. 1. Принцип його роботи ґрунтується на дії зміни температури, що приймається температурним сенсором ІРА — Е420S1 фірми Murata (фотоелектричний, інфрачервоний (ІЧ) сенсор), в якому змінюється вихідна напруга на сенсорі, що змінює ємнісну складову повного опору на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів, що викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

В момент часу, коли температура незмінюється, вимірювання не відбуваються. Якщо на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів виникає від'ємний опір, то з'являються електричні коливання в контурі (контур утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів VT1, VT2 та пасивною індуктивністю L). З подальшою зміною температури, яка приймається сенсором, змінюється вихідна напруга на ньому, яка змінює ємнісну складову повного опору на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів, а це

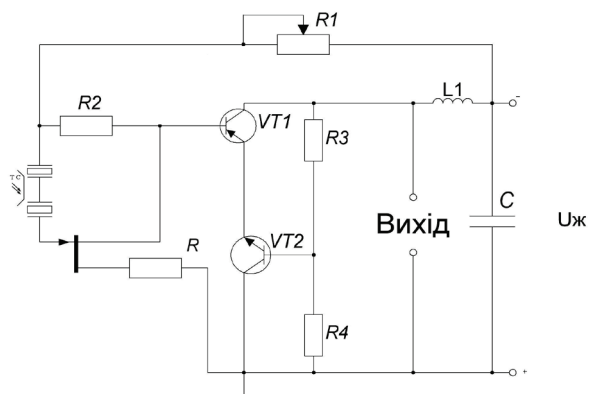


Рис. 1. Електрична схема температурного сенсора на основі структури з пари біполярних транзисторів

викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

Визначення повного опору, в якому активна складова має від'ємний знак (що підтверджує спадна ділянка ВАХ), а реактивна — має ємнісний характер дозволяє віднести розглянутий сенсор до класу приладів з від'ємним опором, що відрізняються багатofункціональністю та простотою. Дослідження і практичне використання приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур неможливе без ґрунтовного дослідження повного опору.

Проведемо розрахунок математичної моделі температурного сенсору на основі методу вузлових потенціалів, склавши і розв'язавши отриману систему рівнянь матричним методом. Для цього записано вираз основної матриці системи —  $A$ , стовпець вільних членів —  $B$  і знайдемо стовпці розв'язків системи —  $X$ , відповідно.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & 0 & a_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & a_{67} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{77} & a_{78} & a_{79} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{89} & a_{810} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{97} & a_{98} & 0 & 0 \\ a_{101} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{110} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \\ b_9 \\ b_{10} \end{pmatrix},$$

$$\text{де } a_{11} = \frac{1}{Z_{R2} + Z_{LB}}; \quad a_{12} = \frac{1}{Z_{CBX}}; \quad a_{13} = -\frac{1}{Z_{RB}}; \quad a_{22} = -\frac{1}{Z_{CBX}} - \frac{1}{Z_{CBK}}; \quad a_{25} = \frac{1}{Z_{RLK}}$$

$$a_{32} = \frac{1}{Z_{CBK}}; \quad a_{33} = \frac{1}{Z_{RB}}; \quad a_{34} = -\frac{1}{Z_{CBE}}; \quad a_{45} = \frac{1}{Z_{RLK}}; \quad a_{54} = \frac{1}{Z_{CBE}}; \quad a_{56} = -\frac{1}{2Z_{RLB}}$$

$$a_{66} = \frac{1}{2Z_{RLE}}; \quad a_{67} = -\frac{1}{Z_{CBX}} - \frac{1}{Z_{CBE}}; \quad a_{77} = \frac{1}{Z_{CBE}}; \quad a_{78} = \frac{1}{Z_{RB}}; \quad a_{79} = -\frac{1}{Z_{CBK}}; \quad a_{89} = \frac{1}{Z_{CBK}}$$

$$a_{810} = -\frac{1}{Z_{RLK}}; \quad a_{97} = \frac{1}{Z_{CBX}}; \quad a_{98} = -\frac{1}{Z_{RB}}; \quad a_{1010} = \frac{1}{Z_{RLK}}; \quad b_2 = I - I_{BK}; \quad b_3 = I_{BK} + I_{BE};$$

$$b_4 = -\frac{U_{Ж}}{Z_C + Z_L} - \frac{U_{Ж}}{Z_{R3}}; \quad b_5 = -I_{BE} - I; \quad b_6 = I + I_{BE}; \quad b_7 = -I_{BK} - I_{BE}; \quad b_8 = I_{BK} - I;$$

$$b_9 = -\frac{U_{Ж}}{Z_{R3}} + \frac{U_{Ж}}{Z_{R4} + Z_{R3}}; \quad b_{10} = -\frac{U_{Ж}}{Z_{R4} + Z_{R3}} + \frac{U_{Ж}}{Z_C}; \quad Z_{R2} = R_2; \quad Z_{R3} = R_3; \quad Z_{R4} = R_4;$$

$$Z_{RB} = R_B; \quad Z_{LB} = j\omega L_B; \quad Z_{CBX} = \frac{-j}{\omega C_{BX}}; \quad Z_{RLK} = R_K + j\omega L_K; \quad Z_{CBK} = \frac{-j}{\omega C_{BK}}; \quad Z_{CBE} = \frac{-j}{\omega C_{BE}}$$

$$Z_{RLE} = R_E + j\omega L_E; \quad I = \frac{I_{BE} - I_{BK}}{Q}; \quad I_{BE} = I_S \exp\left(\frac{U_{BE}}{NE \cdot V_t} - 1\right); \quad I_{BK} = I_S \exp\left(\frac{U_{BK}}{NC \cdot V_t} - 1\right);$$

$$I_S = I_{SS} \exp\left(\frac{U_{jS}}{NS \cdot V_t} - 1\right); \quad \text{де } Q \text{ — заряд в базі; } V_t = kT/q; \quad I_{SS} \text{ — зворотний струм р-п перехо-$$

ду підкладки;  $U_{BE}$  — напруга база-емітер;  $U_{BK}$  — напруга база-колектор;  $U_{jS}$  — контактна різниця потенціалів переходу колектор-підкладка;  $NE$  — коефіцієнт не ідеальності емітерного переходу;  $NC$  — коефіцієнт не ідеальності колекторного переходу;  $NS$  — коефіцієнт не ідеальності переходу підкладки.

Розв'язавши отриману систему рівнянь, визначимо вираз для повного опору сенсора температури і побудуємо відповідну графічну залежність (рис. 2). Графік ілюструє теоретичну залежність активної та реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення, і показує, що

активна складова має від’ємне значення (на рис. 2 показано його модуль), а реактивна складова має ємнісний характер. Вираз для повного опору матиме вигляд

$$Z = \frac{U_{\text{Ж}}}{\frac{Z_{R2} + Z_{RLE}}{Z_{LB} - Z_{RLE}} \cdot \left[ U_{\text{Ж}} \left( \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_{R3}} \right) - 2I_{\text{БЕ}} - I + I_{\text{БК}} - \frac{Z_{\text{СБК}} + Z_{\text{СВХ}}}{Z_{\text{СБК}} \cdot Z_{\text{СВХ}}} \left( U_{\text{Ж}} \left( \frac{1}{Z_C + Z_L} - \frac{1}{Z_{R3}} \right) - I - I_{\text{БК}} \right) \right]} \quad (1)$$

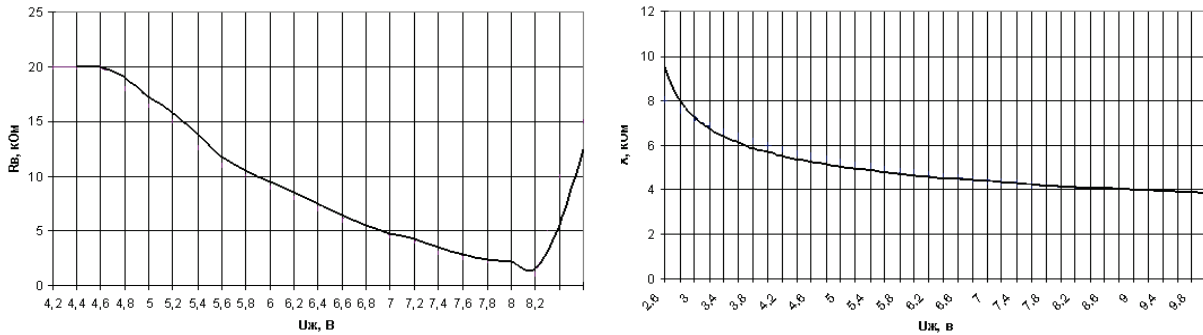


Рис. 2. Теоретична залежність активної та реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення для температурного сенсора з біполярної транзисторної структури

### Математичні моделі сенсора температури з біполярної транзисторної структури та активної індуктивності

Проведемо розрахунок цієї математичної моделі, склавши і розв’язавши систему рівнянь аналогічно пункту 1, проте пам’ятатимемо, що величина індуктивності активного елемента описується виразом

$$L_{\text{ЕКВ}} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{A_4 A_1 + A_3 A_2}{A_1^2 + A_2^2}, \quad (2)$$

де  $A_1 = \omega C_1 \cdot \left[ (R_B + R_E - R_6 \alpha_1)^2 - (R_6 \alpha_2)^2 + \frac{1}{(\omega C_1)^2} \right]$ ;  $A_2 = \omega C_1 \cdot [2R_6 \alpha_2 (R_B + R_E - R_6 \alpha_1)]$ ;

$A_3 = \left[ R_6 \alpha_1 (R_B + R_E - R_6) - (r_B + r_E) \frac{R_6^2}{R_K} - \frac{2\alpha_1 R_6^3}{R_K} + \frac{\alpha_2 R_6^2}{(\omega C_1)^2} \right]$ ;

$A_4 = \left[ 2R_6^2 \alpha_1 \alpha_2 - (R_B + R_E) R_6 \alpha_2 + \frac{2\alpha_2 R_6^3}{R_K} \right]$ ;  $\alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2}$  — дійсна складова коефіцієнта

передачі струму у схемі з загальною базою,  $\alpha_2 = \frac{\alpha_0 f/f_\alpha}{1 + (f/f_\alpha)^2}$  — уявна складова коефіцієнта пере-

дачі струму у схемі з загальною базою,  $R_B, R_E, R_K$  — відповідно опір бази, колектора і емітера транзистора VT4,  $f_\alpha$  — гранична частота біполярного транзистора в схемі з загальною базою,  $f$  — робоча частота,  $\omega = 2\pi f$  — кругова частота.

Добротність активного індуктивного елемента визначається формулою

$$Q = \frac{(A_4 A_1 + A_3 A_2) \omega C_1}{\omega C_1 (A_3 A_1 + A_4 A_2) - (A_1^2 + A_2^2)}. \quad (3)$$

Розв’язавши аналогічно отриману систему рівнянь, визначимо вираз для повного опору сенсора температури і побудуємо відповідну графічну залежність (рис. 4), активної та реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення. З рис. 4 випливає, що активна складова

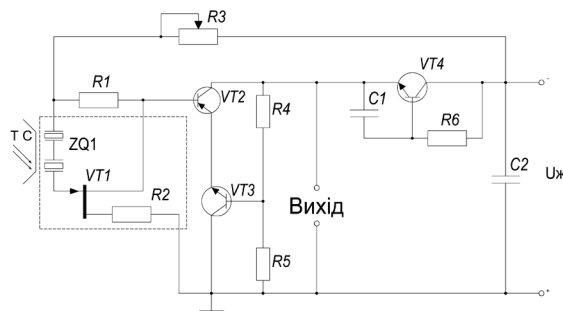


Рис. 3. Електрична схема температурного сенсора з біполярної транзисторної структури та активної індуктивності

має від'ємне значення (показано його модуль), а реактивна складова має ємнісний характер.

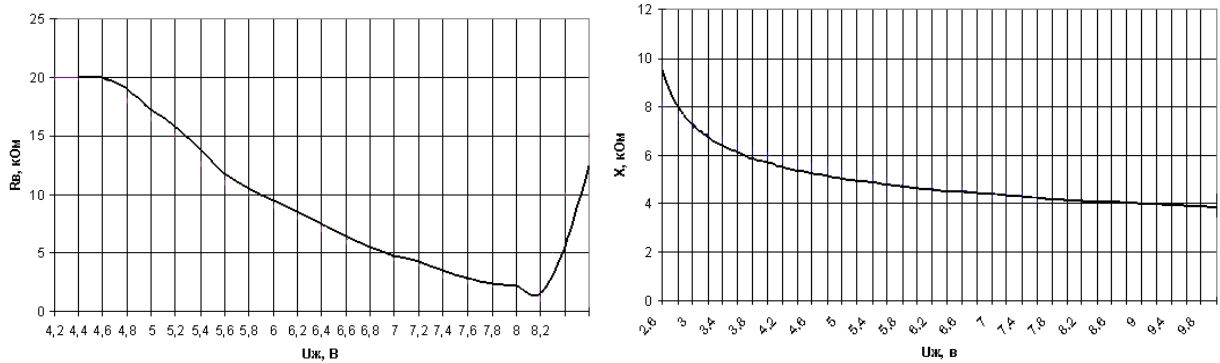


Рис. 4. Теоретична залежність активної та реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення для сенсора з біполярної транзисторної структури та активної індуктивності

Вираз для повного опору матиме вигляд

$$Z = \frac{U_{\text{Ж}}}{\frac{Z_{R2} + Z_{RLE}}{Z_{LB} - Z_{RLE}} \cdot \left[ U_{\text{Ж}} \left( \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_{R3}} \right) - 2I_{\text{БЕ}} - I + I_{\text{БК}} - \frac{Z_{\text{СБК}} + Z_{\text{СВХ}}}{Z_{\text{СБК}} \cdot Z_{\text{СВХ}}} \left( U_{\text{Ж}} \left( \frac{1}{Z_C + Z_{\text{ЛЕКВ}}} - \frac{1}{Z_{R3}} \right) - I - I_{\text{БК}} \right) \right]} \quad (4)$$

### Експериментальне дослідження температурних сенсорів

Вимірювальна установка (рис. 5) працює так. Джерело температури створює відповідну температуру (з певною періодичністю так як сенсор реагує на зміну температури), яка, в свою чергу, вимірюється контролюючим температурою сенсором для підтвердження точності та визначення похибки вимірювань. Одночасно спрацьовує сенсор температури, що її фіксує. Джерело живлення, джерело подачі наруги керування використовуються для забезпечення роботи схеми. Часто для того, щоб збільшити чутливість до ПЧ випромінювання, застосовуються лінзи Френеля (іноді вони навіть продаються разом з сенсором). Проте в цьому випадку чутливість становить 3,4 мВ, чого цілком достатньо для нормальної роботи без використання лінз Френеля.

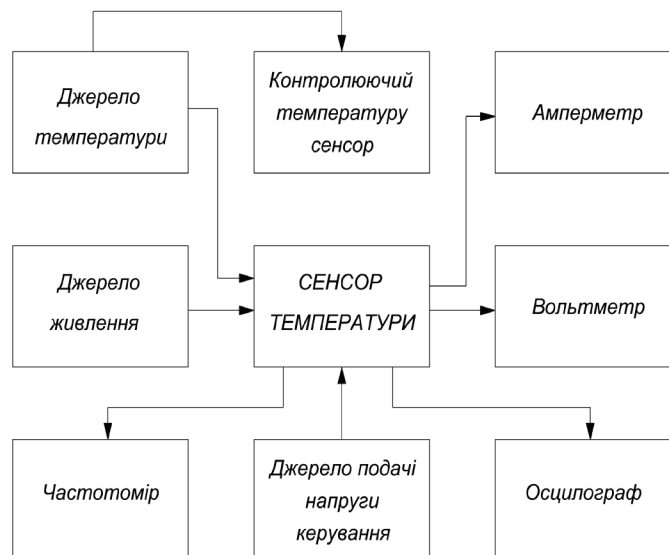


Рис. 5. Блок-схема вимірювальної установки

На рис. 6 показано вольт-амперні характеристики, що мають ділянку з від'ємним опором, на якій вибирається робоча точка. Графік рис. 6 підтверджує існування від'ємного опору в схемі. На рис. 7 та рис. 8 показані експериментальні залежності активної та реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення для двох систем, відповідно, які можна порівняти з рис. 2 та рис. 4, відповідно. Крім того, експериментальні графіки цілком збігаються з теоретичними, які вказують на те, що активна складова повного опору має від'ємне значення (на рис. 4, показано його модуль), а реактивна складова має ємнісний характер. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення для обох систем сенсорів зображена на рис. 9, яка знадобиться пізніше після виведення теоретичної функції перетворення. Крім того, графік на рис. 9 показує, що зі збільшенням напруги живлення значення генерованої частоти теж збільшується.

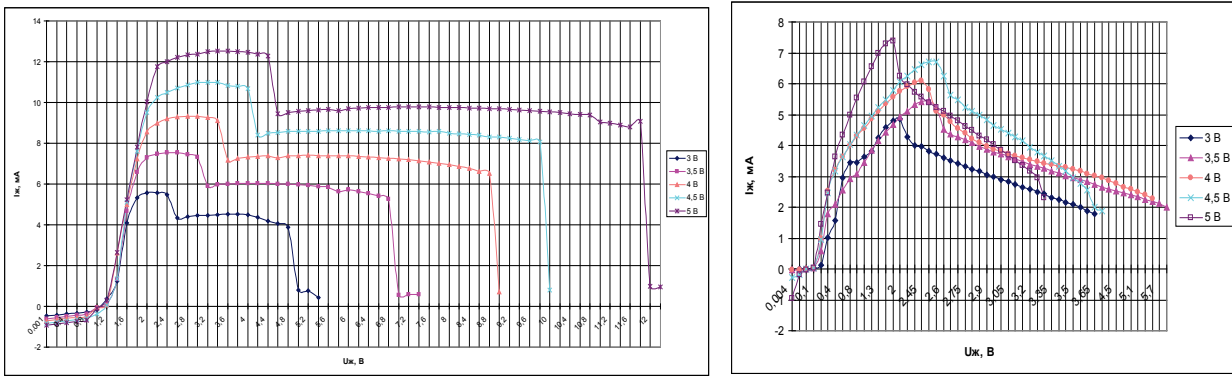


Рис. 6. Вольт-амперна характеристика для обох схем сенсорів

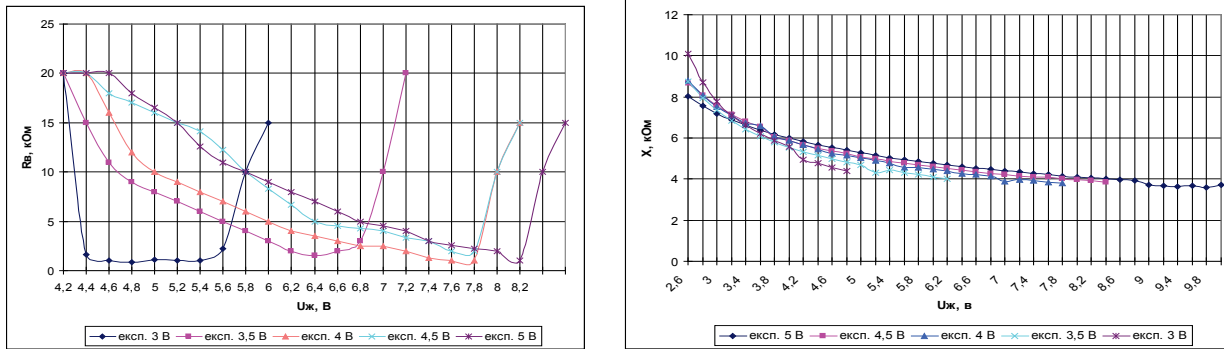


Рис. 7. Експериментальні (з напругами керування 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) залежності активної та реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення

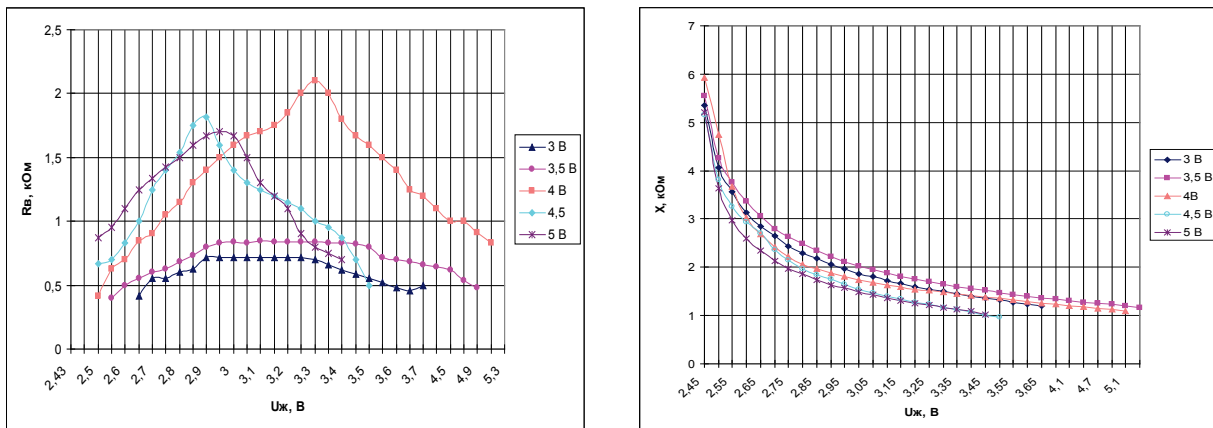


Рис. 8. Експериментальні (з напругами керування 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) залежності активної складової повного комплексного опору від напруги живлення

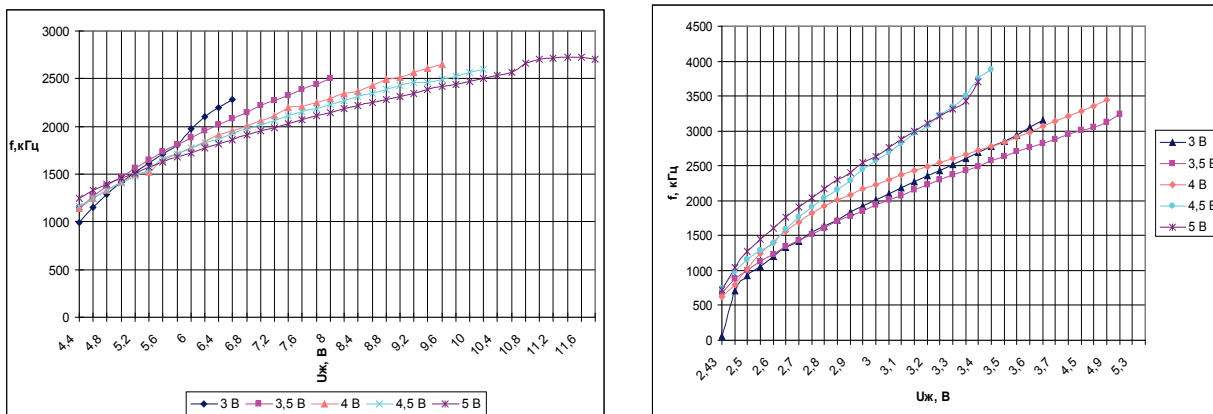


Рис. 9. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення для обох схем сенсорів

## Висновки

1. Вперше розроблено математичну модель сенсора температури на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором, яка, на відміну від існуючих, враховує зміну активної та реактивної складових повного опору від зміни інфрачервоного випромінювання:

— здійснено побудову та розрахунок математичних моделей температурних сенсорів на основі структури, що складається з пари біполярних транзисторів та аналогічної схеми з активною індуктивністю;

— отримано аналітичний вираз для повного опору та теоретичні залежності реактивної та активної складових повного комплексного опору температурних сенсорів на основі цих структур.

2. Проведено експериментальне дослідження основних характеристик сенсорів температури, за допомогою яких встановлено залежності та побудовано графіки. Здійснено експериментальне дослідження вольт-амперної характеристики температурних сенсорів, а також доведено наявність на електродах колектор–колектор біполярних транзисторів від'ємного опору, що відповідає спадній ділянці ВАХ. Визначено, що активна складова повного комплексного опору набуває від'ємного значення, а реактивна — має ємнісний характер. Визначені їх залежності від напруги живлення для всіх температурних сенсорів; здійснено експериментальне дослідження залежності частоти генерації від напруги живлення температурних сенсорів. Визначено, що підключення пасивної та активної індуктивності до виводів ємнісного опору, створеного парою транзисторів, при від'ємних значеннях повного комплексного опору (при компенсації втрат енергії в коливальному контурі), дозволяє створити генератор електричних коливань.

3. Розроблені сенсори температури, сумісні з цифровими системами обробки інформації. Вони можуть бути виготовлені за стандартною груповою інтегральною технологією. Це дозволяє значно знизити вартість систем контролю та керування, повною мірою реалізувати переваги мікроелектронних сенсорів (висока надійність за рахунок скорочення числа між'єднань, малі габарити та маса, взаємозамінність і стабільність характеристик), а також створити «інтелектуальні» вимірювальні перетворювачі шляхом інтеграції чутливого елемента та схеми обробки в об'ємі одного кристалу.

Впроваджено в ТОВ НВП «Укртерм».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Поскачей А. А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 246 с.
2. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. — 163 с. — ISBN 978-966-641-214-3.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 11.03.11

Рекомендована до друку 27.09.11

**Осадчук Олександр Володимирович** — завідувач кафедри, **Деундяк Марина Володимирівна** — аспірантка.

Кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Деундяк Володимир Петрович** — головний інженер.

НВП «Укртерм», Вінниця