

УДК 621.38

**В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; О. В. Осадчук, д. т. н., проф.; В. П. Деундяк;
М. В. Деундяк**

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИКО-ЧАСТОТНИХ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ СТРУКТУРИ, ЩО СКЛАДАЄТЬСЯ З ПАРИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ ТА АКТИВНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ

У статті розглянуто оптико-електронні прилади для вимірювання температури, які об'єднують широкий клас пристроїв. Високі технічно-експлуатаційні характеристики оптичних сенсорів температури дозволяють їх використовувати в різних галузях господарства, науки і техніки.

***Ключові слова:** оптико-частотний температурний сенсор, від'ємний опір, давач температури, перетворювач напруга-частота, температура, опір з ємнісним характером, активна індуктивність.*

Вступ

Проблема створення системи уніфікованих оптико-частотних сенсорів температури з високими метрологічними характеристиками та вихідним сигналом, який можна перетворити у форму коду з незначними похибками, залишається досить актуальною. Використання реактивних властивостей транзисторних структур для перетворення напруги в частоту є одним із найефективніших шляхів розв'язання цієї проблеми.

Дана робота присвячена створенню та дослідженню оптико-частотних сенсорів температури, дія яких ґрунтується на функціональній залежності імпедансу напівпровідникових приладів від однієї з найбільш поширених неелектричних величин – температури, що представляє теоретичний та практичний інтерес, а тому дозволяє вважати актуальною.

Основна частина

Ефективно вирішити проблему дистанційного вимірювання температури дозволяє пристрій, зображений на рис. 1. Принцип дії оптико-частотного температурного сенсора ґрунтується на дії зміни температури, що приймається температурним давачем IRA – E420S1 фірми Murata (фотоелектричний, інфрачервоний давач). Таким чином змінюється вихідна напруга на давачеві, яка призводить до зміни ємнісної складової повного опору, утвореного електродами колектор-колектор пари біполярних транзисторів та активною індуктивністю, що викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

Коли не змінюється температура, вимірювання не відбуваються. У момент часу, коли на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів виникає від'ємний опір, який призводить до виникнення електричних коливань у контурі (контур утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів VT2, VT3 та активною індуктивністю, що утворюється увімкненням конденсатора C1, транзистора VT4, резистора R6). При наступній дії зміни температури, що приймається давачем, змінюється вихідна напруга на ньому, яка змінює ємнісну складову повного опору на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів, а це викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

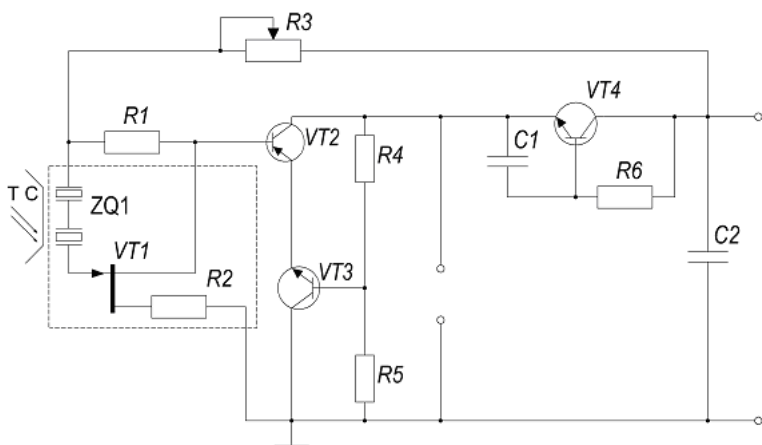


Рис. 1. Електрична схема оптико-частотного температурного сенсора на основі структури з пари біполярних транзисторів та активної індуктивності

Існує потреба в теоретичному та практичному доведенні того, що на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів є від'ємний опір, який відповідає спадній ділянці вольтамперної характеристики (ВАХ). Крім того, для вивчення роботи оптико-частотного температурного сенсора в динамічному режимі необхідно отримати залежність активної та реактивної складової комплексного опору електродів колектор-колектор структури. Щоб це здійснити, представимо схему пристрою, враховуючи еквівалентні схеми транзисторів. Отримана схема представлена на рис. 2.

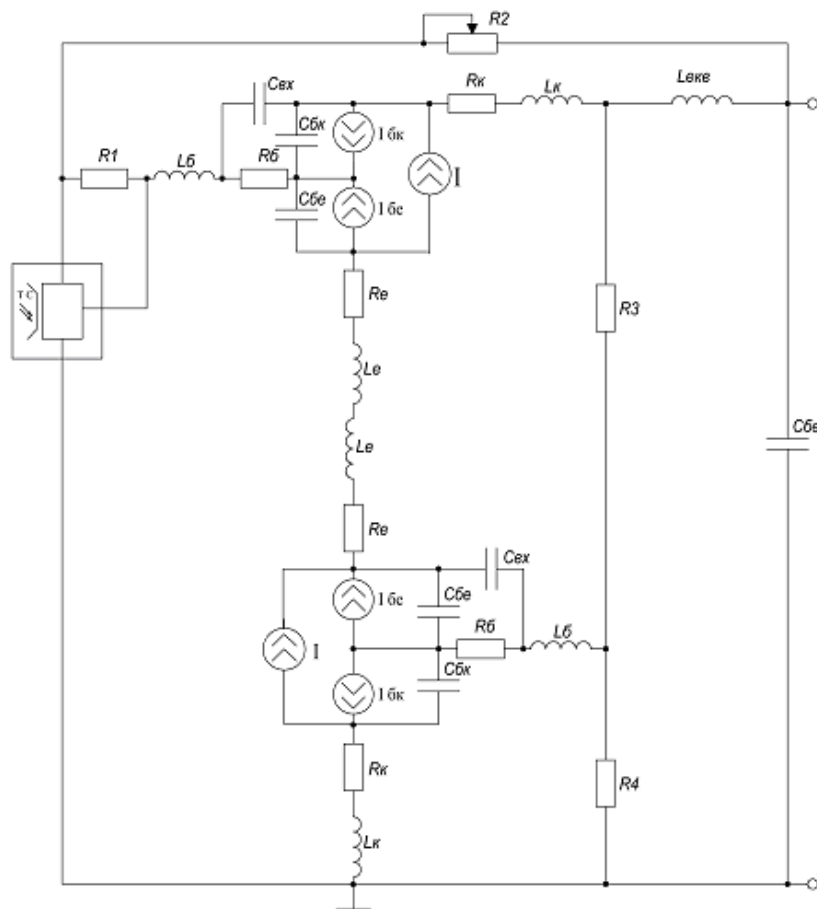


Рис. 2. Еквівалентна схема оптико-частотного температурного сенсора на основі структури з пари біполярних транзисторів

Для зручності розрахунків спрощену еквівалентну схему оптико-частотного температурного сенсора подано на рис. 3.

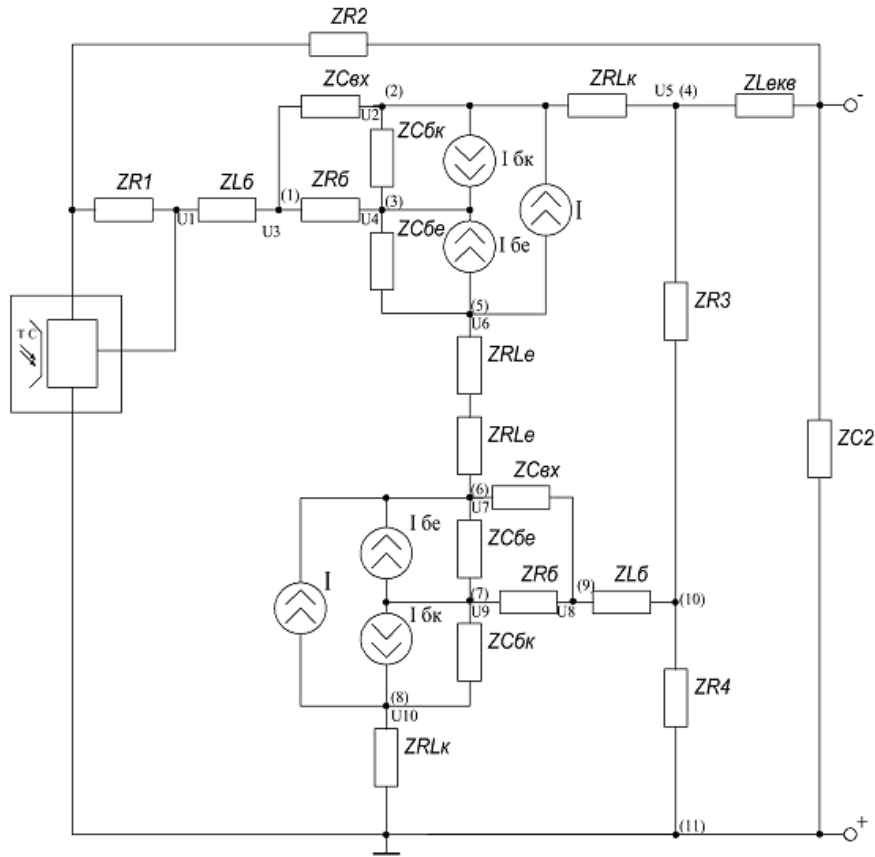


Рис. 3. Спрощена еквівалентна схема оптико-частотного температурного сенсора на основі структури з пари біполярних транзисторів

$$\text{Причому } Z_{R2} = R_2; Z_{R3} = R_3; Z_{R4} = R_4; Z_{R5} = R_5; Z_{L5} = j\omega L_5; Z_{CBX} = \frac{-j}{\omega C_{BX}}; Z_{LEKB} = j\omega L_{LEKB};$$

$$Z_{RLK} = R_K + j\omega L_K; Z_{CBK} = \frac{-j}{\omega C_{BK}}; Z_{CBE} = \frac{-j}{\omega C_{BE}}; Z_{RLE} = R_E + j\omega L_E.$$

Проведемо розрахунок даної математичної моделі за допомогою системи рівнянь.

Розв'яжемо отриману систему рівнянь матричним методом. Для чого запишемо вираз основної матриці системи – А, стовбець вільних членів – В і знайдемо стовбці розв'язків системи – Х, відповідно.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & 0 & a_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & a_{67} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{77} & a_{78} & a_{79} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{89} & a_{810} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{97} & a_{98} & 0 & 0 \\ a_{101} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{110} \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \\ b_9 \\ b_{10} \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} \text{де } a_{11} &= \frac{1}{Z_{R2} + Z_{LB}}; & a_{12} &= \frac{1}{Z_{CBX}}; & a_{13} &= -\frac{1}{Z_{RB}}; & a_{22} &= -\frac{1}{Z_{CBX}} - \frac{1}{Z_{CBK}}; & a_{25} &= \frac{1}{Z_{RLK}}; \\ a_{32} &= \frac{1}{Z_{CBK}}; & a_{33} &= \frac{1}{Z_{RB}}; & a_{34} &= -\frac{1}{Z_{CBE}}; & a_{45} &= \frac{1}{Z_{RLK}}; & a_{54} &= \frac{1}{Z_{CBE}}; & a_{56} &= -\frac{1}{2Z_{RLB}}; & a_{66} &= \frac{1}{2Z_{RLE}}; \\ a_{67} &= -\frac{1}{Z_{CBX}} - \frac{1}{Z_{CBE}}; & a_{77} &= \frac{1}{Z_{CBE}}; & a_{78} &= \frac{1}{Z_{RB}}; & a_{79} &= -\frac{1}{Z_{CBK}}; & a_{89} &= \frac{1}{Z_{CBK}}; & a_{810} &= -\frac{1}{Z_{RLK}}; & a_{97} &= \frac{1}{Z_{CBX}}; \\ a_{98} &= -\frac{1}{Z_{RB}}; & a_{1010} &= \frac{1}{Z_{RLK}}; & b_2 &= I - I_{BK}; & b_3 &= I_{BK} + I_{BE}; & b_4 &= -\frac{U_{Ж}}{Z_C + Z_{LEKB}} - \frac{U_{Ж}}{Z_{R3}}; \\ b_5 &= -I_{BE} - I; & b_6 &= I + I_{BE}; & b_7 &= -I_{BK} - I_{BE}; & b_8 &= I_{BK} - I; & b_9 &= -\frac{U_{Ж}}{Z_{R3}} + \frac{U_{Ж}}{Z_{R4} + Z_{R3}}; \\ b_{10} &= -\frac{U_{Ж}}{Z_{R4} + Z_{R3}} + \frac{U_{Ж}}{Z_C}. \end{aligned}$$

Причому величина індуктивності активного елемента описується виразом:

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

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

$$A_2 = \omega C_1 \cdot [2R_6 \alpha_2 (R_B + R_E - R_6 \alpha_1)],$$

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

$$A_4 = \left[2R_6^2 \alpha_1 \alpha_2 - (R_B + R_E) R_6 \alpha_2 + \frac{2\alpha_2 R_6^3}{R_K} \right],$$

$\alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2}$ - 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 передачі струму у схемі з загальною базою,

R_B, R_E, R_K - відповідно опір бази, колектора і емітера транзистора VT4, f_α - гранична частота біполярного транзистора в схемі з загальною базою, f - робоча частота, $\omega = 2\pi f$ - кругова частота.

Добротність активного індуктивного елемента визначається формулою:

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

Струми база-емітер I_{BE} і база-колектор I_{BK} описуються виразами:

$$I = \frac{I_{BE} - I_{BK}}{Q}, \quad (3)$$

$$I_{BE} = I_S \exp\left(\frac{U_{BE}}{NE \cdot V_t} - 1\right), \quad (4)$$

$$I_{BK} = I_S \exp\left(\frac{U_{BK}}{NC \cdot V_t} - 1\right), \quad (5)$$

$$I_S = I_{SS} \exp\left(\frac{U_{JS}}{NS \cdot V_t} - 1\right), \quad (6)$$

де Q - заряд у базі; $V_t = kT/q$; I_{SS} - зворотний струм р-п переходу 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 неідеальності колекторного переходу; NS - коефіцієнт неідеальності переходу

підкладки.

Розв'язавши отриману систему рівнянь, визначимо вираз для повного опору оптико-частотного сенсора температури, що матиме вигляд:

$$Z = \frac{U_{Ж}}{\frac{Z_{R2} + Z_{RLE}}{Z_{LB} - Z_{RLE}} \left[U_{Ж} \left(\frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_{R3}} \right) - 2I_{BE} - I + I_{BK} - \frac{Z_{CBK} + Z_{CBX}}{Z_{CBK} \cdot Z_{CBX}} \left(U_{Ж} \left(\frac{1}{Z_C + Z_{LEKB}} - \frac{1}{Z_{R3}} \right) - I - I_{BK} \right) \right]} \quad (7)$$

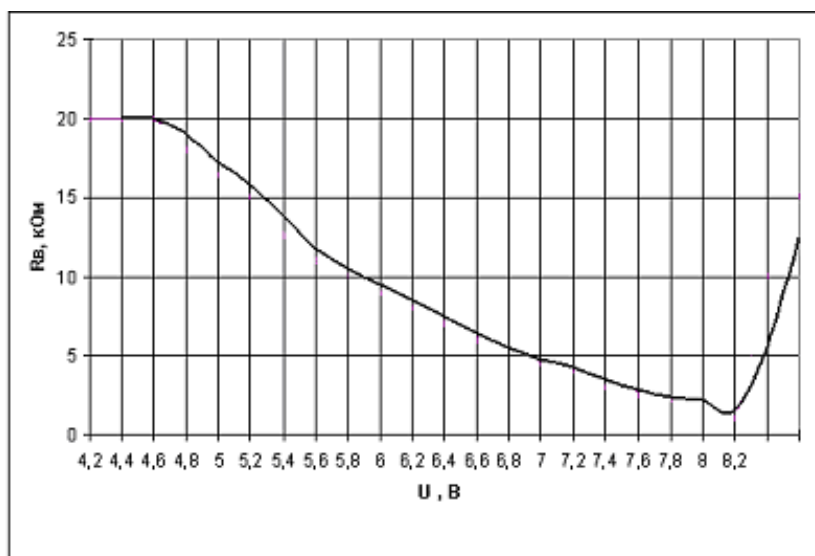


Рис. 4. Теоретична залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для оптико-частотного температурного сенсора на основі структури, що складається з пари біполярних транзисторів та активної індуктивності

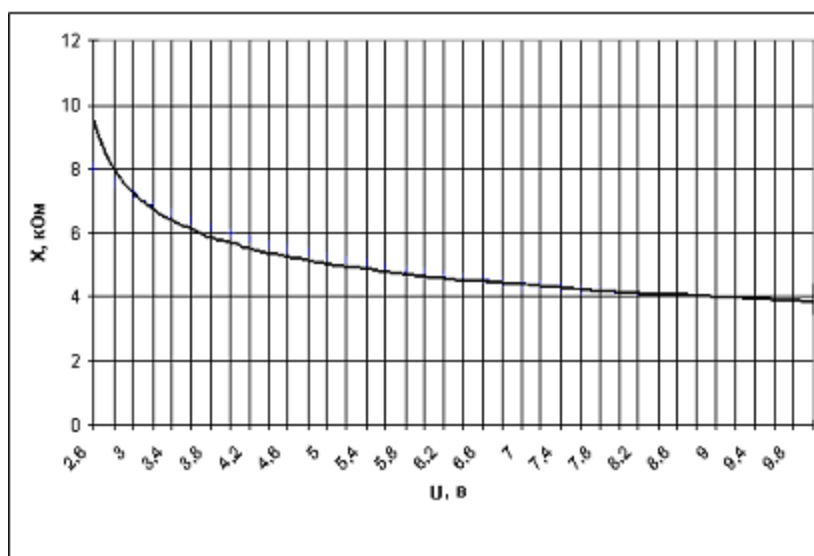


Рис. 5. Теоретична залежність реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення для оптико-частотного температурного сенсора на основі структури, що складається з пари біполярних транзисторів та активної індуктивності

Висновки

1. Уперше було здійснено побудову математичних моделей оптико-частотних температурних сенсорів на основі структури, що складається з пари біполярних транзисторів та активної індуктивності.

2. Були представлені еквівалентні схеми пристроїв з врахуванням еквівалентних схем транзисторів, у результаті чого було отримано еквівалентну та спрощену еквівалентну схему оптико-частотного температурного сенсора.

3. Проведено розрахунок даних математичних моделей оптико-частотного температурного сенсора на основі структури, що складається з пари біполярних транзисторів та активної індуктивності, шляхом складання і розв'язку системи рівнянь.

4. Після вирішення отриманої системи рівнянь, було виведено вираз для повного опору оптико-частотного температурного сенсора на основі структури, що складається з пари біполярних транзисторів та активної індуктивності.

5. Отримано теоретичні залежності реактивної та активної складової повного комплексного опору від напруги живлення оптико-частотного температурного сенсора на основі структури, що складається з пари біполярних транзисторів та активної індуктивності.

СПИСОК 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. Микроэлектронные сенсоры температуры с частотным выходом. / В. С. Осадчук, А. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2007. – 163 с.
3. Осадчук А. В. Микроэлектронные частотные преобразователи на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением. / А. В. Осадчук. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2000. – 302 с.
4. Пат. 33239 Украина. МПК7 G 01 K 5/00. Оптический сенсор температуры с частотным выходом / Осадчук В. С., Осадчук А. В., Деундяк В. П., Деундяк Г. В.; заявитель и патентообладатель Винницкий национальный технический университет. – № u200802333; заявл. 22.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.
5. Пат. 33240 Украина. МПК7 G 01 K 11/00. Микроэлектронный оптический сенсор температуры с частотным выходом / Осадчук В. С., Осадчук А. В., Деундяк В. П., Деундяк Г. В.; заявитель и патентообладатель Винницкий национальный технический университет. – № u200802335; заявл. 22.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

Осадчук Володимир Степанович – д. т. н., професор кафедри електроніки, e-mail: osadchuk69@mail.ru, тел.: (0432)-598013.

Осадчук Олександр Володимирович – д. т. н., професор, завідувач кафедри радіотехніки. Вінницький національний технічний університет.

Деундяк Володимир Петрович – головний інженер, ТОВ НВП «Укртерм», м. Вінниця.

Деундяк Марина Володимирівна – магістрантка першого курсу навчання. Вінницький національний технічний університет.