

УДК 621.38

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

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИКО-ЧАСТОТНЫХ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ, КОТОРАЯ СОСТОИТ ИЗ ПАРЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И АКТИВНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

В статье рассмотрены оптико-электронные приборы для измерения температуры, которые объединяют широкий класс устройств. Высокие технико-эксплуатационные характеристики оптических сенсоров температуры позволяют их применять в разных отраслях хозяйства, науки и техники.

Ключевые слова: оптико-частотный температурный сенсор, отрицательное сопротивление, датчик температуры, преобразователь напряжение-частота, температура, сопротивление с емкостным характером, активная индуктивность.

Введение

Проблема создания системы унифицированных оптико-частотных сенсоров температуры с высокими метрологическими характеристиками и исходным сигналом, который можно превратить в форму кода с незначительными погрешностями, остается достаточно актуальной. Использование реактивных свойств транзисторных структур для преобразования напряжения в частоту является одним из самых эффективных путей решения этой проблемы.

Данная работа посвящена созданию и исследованию оптико-частотных сенсоров температуры, действие которых основывается на функциональной зависимости импеданса полупроводниковых приборов от одной из наиболее распространенных неэлектрических величин – температуры, которая представляет теоретический и практический интерес, а тему позволяет считать актуальной.

Основная часть

Эффективно решить проблему дистанционного измерения температуры позволяет устройство, изображенное на рис. 1. Принцип действия оптико-частотного температурного сенсора основывается на воздействии изменения температуры, которая принимается температурным датчиком IRA-E420S1 фирмы Murata (фотоэлектрический, инфракрасный датчик). Таким образом изменяется выходное напряжение на датчике, которое приводит к изменению емкостной составляющей полного сопротивления на электродах коллектор-коллектор пары биполярных транзисторов и активной индуктивностью, что вызывает изменение резонансной частоты колебательного контура.

Когда не изменяется температура, измерения не происходят. В момент, когда на электродах коллектор-коллектор пары биполярных транзисторов возникает отрицательное сопротивление, которое приводит к возникновению электрических колебаний в контуре (контур образован параллельным включением полного сопротивления с емкостным характером на электродах коллектор-коллектор пары биполярных транзисторов VT1, VT2 и активной индуктивностью, которая образуется включением конденсатора C1, транзистора VT4, резистора R6). При следующем изменении температуры, которое принимается датчиком, изменяется исходное напряжение на нем, которое изменяет емкостную составляющую полного сопротивления на электродах коллектор-коллектор пары биполярных транзисторов, а это вызывает изменение резонансной частоты колебательного контура.

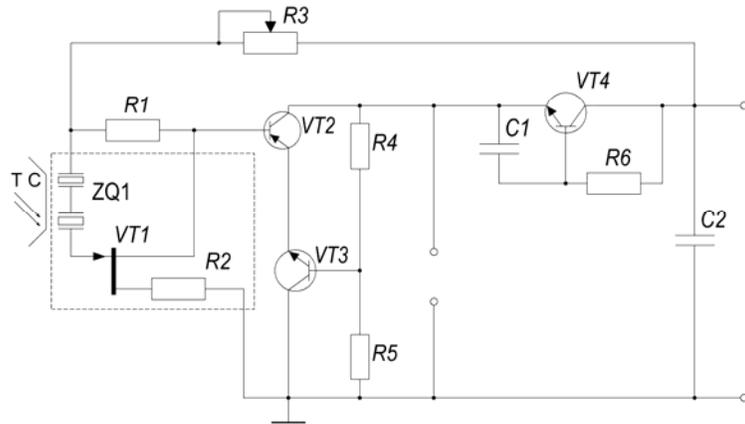


Рис. 1. Электрическая схема опико-частотного температурного сенсора

Существует потребность в теоретическом и практическом доказательстве того, что на электродах коллектор-коллектор биполярных транзисторов есть отрицательное сопротивление, которое отвечает ниспадающему участку вольтамперной характеристики (ВАХ). Кроме того, для изучения работы опико-частотного температурного сенсора в динамическом режиме необходимо получить зависимость активной и реактивной составляющей комплексного сопротивления электродов коллектор-коллектор структуры. Чтобы это осуществить, представим схему устройства, учитывая эквивалентные схемы транзисторов. Полученная схема представлена на рис. 2.

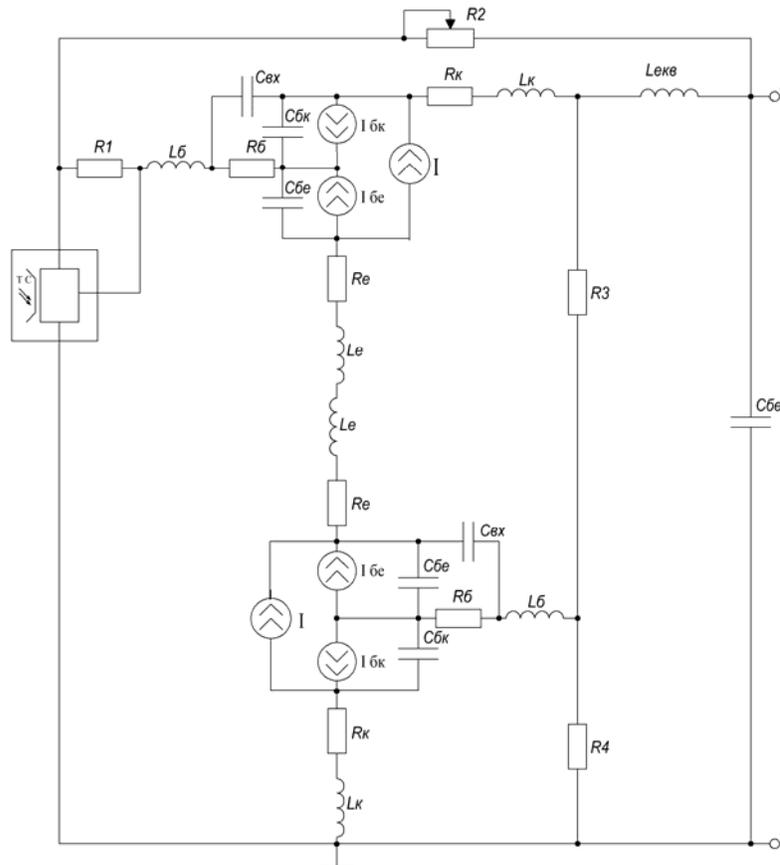


Рис. 2. Эквивалентная схема опико-частотного температурного сенсора

Для удобства расчетов используется упрощенная эквивалентная схема опико-частотного

температурного сенсора, представленная на рис. 3.

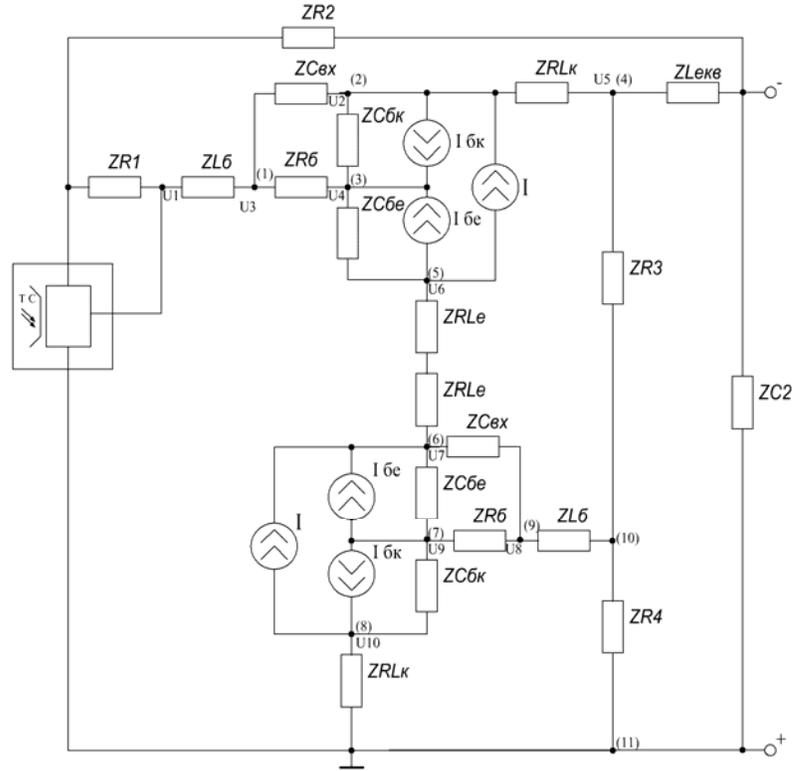


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема оптико-частотного температурного сенсора

Причем, $Z_{R2} = R_2; Z_{R3} = R_3; Z_{R4} = R_4; Z_{R5} = R_5; Z_{L5} = j\omega L_5; Z_{CBX} = \frac{-j}{\omega C_{BX}}; Z_{LEKB} = j\omega L_{LEKB};$
 $Z_{RLK} = R_K + j\omega L_K; Z_{CBK} = \frac{-j}{\omega C_{BK}}; Z_{CBE} = \frac{-j}{\omega C_{BE}}; Z_{RLE} = R_E + j\omega L_E.$

Проведем расчет данной математической модели с помощью решения системы уравнений. Решим полученную систему уравнений матричным методом. Для чего запишем выражение основной матрицы системы – А, столбец свободных членов – В и найдем столбцы решений системы – Х соответственно.

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

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

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

Причем, величина индуктивности активного элемента описывается выражением:

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

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

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

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

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

$\alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2}$ – действительная составляющая коэффициента передачи тока в схеме с общей базой, $\alpha_2 = \frac{\alpha_0 f/f_\alpha}{1 + (f/f_\alpha)^2}$ – мнимая составляющая коэффициента передачи тока в схеме с общей базой, R_B, R_E, R_K – соответственно сопротивление базы, эмиттера и коллектора транзистора VT4, f_α – предельная частота биполярного транзистора в схеме с общей базой, f – рабочая частота, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

Добротность активного индуктивного элемента определяется формулой:

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

Токи база-эмиттер I_{BE} и база-коллектор I_{BK} описаны выражениями:

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

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

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

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

где Q – заряд в базе; $V_t = kT/q$; I_{SS} – обратный ток р-п перехода подложки; U_{BE} – напряжение база-эмиттер; U_{BK} – напряжение база-коллектор; U_{JS} – контактная разность потенциалов перехода коллектор-подложка; NE – коэффициент неидеальности эмиттерного перехода; NC – коэффициент неидеальности коллекторного перехода; NS – коэффициент неидеальности перехода подложки.

Решив полученную систему уравнений, определим выражение для полного сопротивления оптико-частотного сенсора температуры, которое будет иметь вид:

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

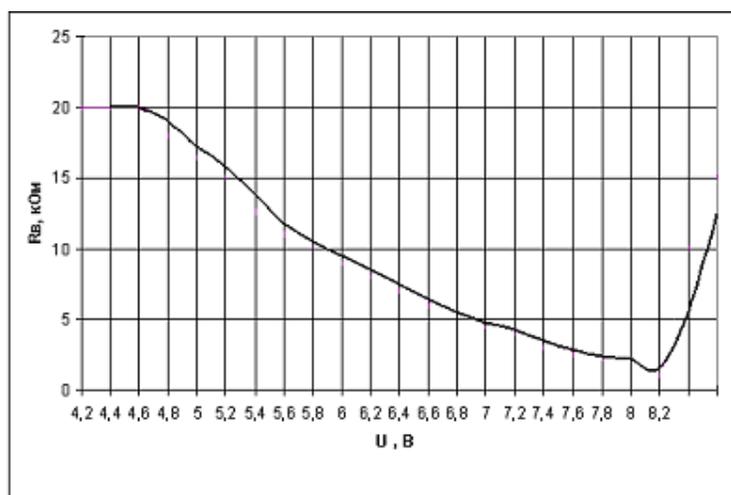


Рис. 4. Теоретическая зависимость активной составляющей полного комплексного сопротивления от напряжения питания для опико-частотного температурного сенсора на основе структуры, которая состоит из пары биполярных транзисторов и активной индуктивности

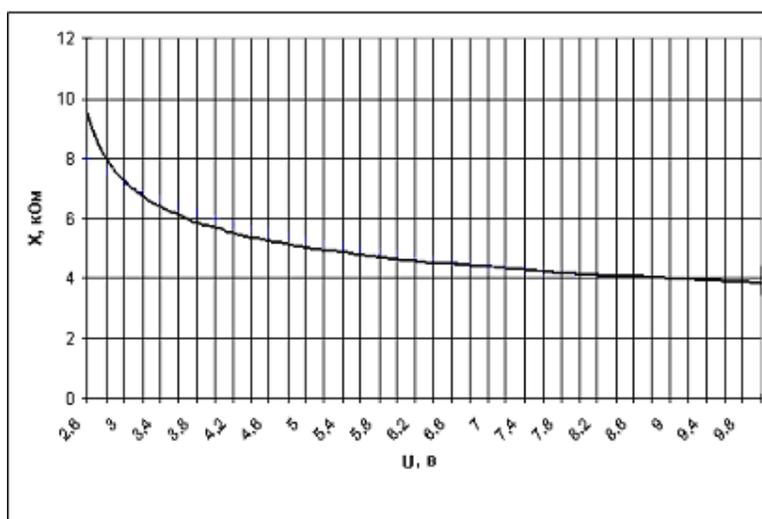


Рис. 5. Теоретическая зависимость реактивной составляющей полного комплексного сопротивления от напряжения питания для опико-частотного температурного сенсора на основе структуры, которая состоит из пары биполярных транзисторов и активной индуктивности

Выводы

1. Впервые были построены математические модели опико-частотных температурных сенсоров на основе структуры, которая состоит из пары биполярных транзисторов и активной индуктивности.

2. Были представлены эквивалентные схемы устройств с учетом эквивалентных схем транзисторов, в результате чего была получена эквивалентная и упрощенная эквивалентная схема опико-частотного температурного сенсора.

3. Проведен расчет данных математических моделей опико-частотного температурного сенсора на основе структуры, которая состоит из пары биполярных транзисторов и активной индуктивности, путем составления и решения системы уравнений.

4. После решения полученной системы уравнений, было выведено выражение для полного сопротивления опико-частотного температурного сенсора на основе структуры, которая состоит из пары биполярных транзисторов и активной индуктивности.

5. Получены теоретические зависимости реактивной и активной составляющей полного комплексного сопротивления от напряжения питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

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 Владимир Степанович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электроники, e-mail: osadchuk69@mail.ru, тел.: (0432)-598013.

Осадчук Александр Владимирович – д. т. н., профессор кафедры радиотехники. Винницкого национального технического университета.

Деундяк Владимир Петрович – главный инженер, НПП «Укртерм», г. Винница.

Деундяк Марина Владимировна – студентка факультета радиотехники и телекоммуникаций. Винницкого национального технического университета.