

УДК 621.38

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

ОПТИКО-ЧАСТОТНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ СЕНСОР

В статье рассмотрены оптико-электронные приборы для измерения температуры, которые объединяют широкий класс устройств. Высокие технико-эксплуатационные характеристики оптических сенсоров температуры позволяют их применение 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, пассивная индуктивность.

Усовершенствование полупроводниковой технологии позволяет расширить область применения сенсоров, а также повысить точность измерения, быстродействие, надежность, долговечность, удобство согласования с электронными измерительными схемами. Массовый характер производства сенсоров способствует снижению цены на них, что предопределяет их широкое практическое использование. Кроме того, путем измерения температуры можно определить и другие параметры такие как поток, уровень и др.

Использование достижений современной микроэлектронной технологии привело к значительным успехам в создании разнообразных устройств контроля и управления. Однако часто получение высоких метрологических характеристик аппаратуры достигается за счет повышения ее сложности, габаритов, массы и стоимости. Для последующего существенного повышения качества первичных преобразователей необходимо использовать новые физические явления, а также заниматься поиском новых принципов реализации устройств, которые отмечаются многофункциональностью, мало потребляемой мощностью, стабильностью характеристик, высокой чувствительностью, повышенным быстродействием и надежностью.

Важной разновидностью сенсоров являются сенсоры температуры, ведь множество процессов регулируются в соответствии со значением температуры. Для измерения температуры в настоящее время используются полупроводниковые или микроэлектронные сенсоры, которые выполнены в виде микросхем, инфракрасные сенсоры, термометры сопротивления, термисторы, термопары. Использование температурных сенсоров, как правило, основывается на измерении зависимости электрического сопротивления от температуры, с исключением сенсоров на основе термопар, где возникает электродвижущая сила (ЕДС), пропорциональная температуре.

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, что приводит к изменению емкостной составляющей полного сопротивления на электродах коллектор-коллектор пары биполярных транзисторов, что вызывает изменение резонансной частоты колебательного контура (рис. 1). Предлагаемое устройство состоит из датчика температуры и преобразователя напряжение-частота.

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 пассивной индуктивностью L). 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.

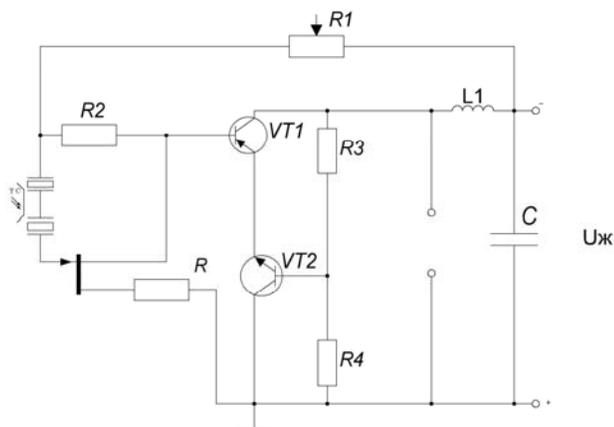


Рис. 1. Электрическая схема оптико-частотного температурного сенсора

Эффективно решить проблему дистанционного измерения температуры позволяет устройство, изображенное на рис. 1. 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 оптико-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. Получим схему на рис. 2.

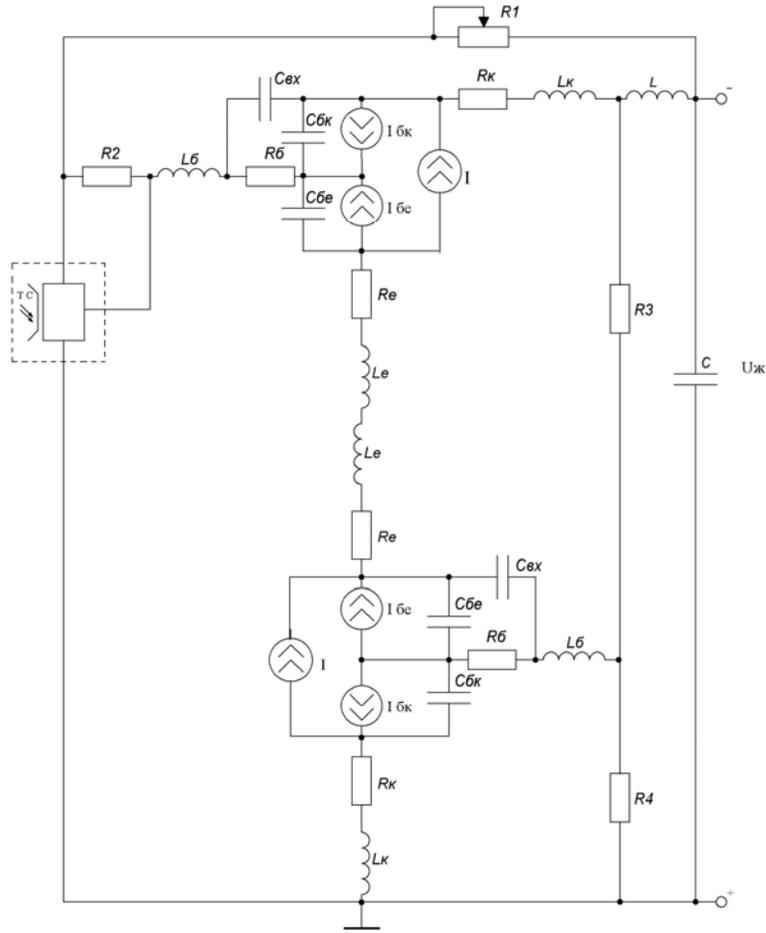


Рис. 2. Эквивалентная схема оптико-частотного температурного сенсора

Для удобства расчетов упрощенная эквивалентная схема оптико-частотного температурного сенсора подана на рис. 3.

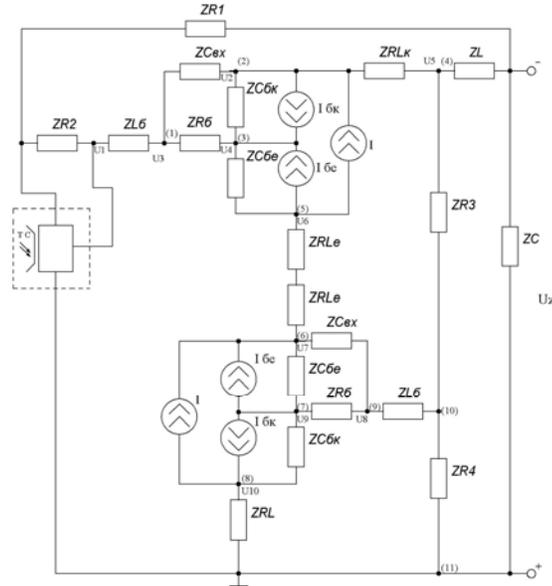


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема оптико-частотного температурного сенсора

Проведем расчет данной математической модели на основе метода узловых потенциалов, составив и решив систему уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_1}{Z_{R2} + Z_{LB}} + \frac{U_2}{Z_{CBX}} - \frac{U_3}{Z_{RB}} = 0; \\ -\frac{U_2}{Z_{CBX}} - \frac{U_2}{Z_{CBK}} + \frac{U_5}{Z_{RLK}} = I - I_{BK}; \\ \frac{U_2}{Z_{CBK}} + \frac{U_3}{Z_{RB}} - \frac{U_4}{Z_{CBE}} = I_{BK} + I_{BE}; \\ \frac{U_{Ж}}{Z_C + Z_L} - \frac{U_5}{Z_{RLK}} - \frac{U_{Ж}}{Z_{R3}} = 0; \\ \frac{U_4}{Z_{CBE}} - \frac{U_6}{2Z_{RLB}} = -I_{BE} - I; \\ \frac{U_6}{2Z_{RLE}} - \frac{U_7}{Z_{CBX}} - \frac{U_7}{Z_{CBE}} = I + I_{BE}; \\ \frac{U_7}{Z_{CBE}} + \frac{U_8}{Z_{RB}} - \frac{U_9}{Z_{CBK}} = -I_{BK} - I_{BE}; \\ \frac{U_9}{Z_{CBK}} - \frac{U_{10}}{Z_{RLK}} = I_{BK} - I; \\ \frac{U_7}{Z_{CBX}} + \frac{U_{11}}{Z_{RLB}} - \frac{U_8}{Z_{RB}} = 0; \\ \frac{U_{Ж}}{Z_{R3}} - \frac{U_{11}}{Z_{RLB}} - \frac{U_{Ж}}{Z_{R4} + Z_{R3}} = 0; \\ \frac{U_{Ж}}{Z_{R4} + Z_{R3}} - \frac{U_{Ж}}{Z_C} + \frac{U_{10}}{Z_{RLK}} - \frac{U_1}{Z_{R2} + Z_{LB}} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $Z_{R2} = R_2; Z_{R3} = R_3; Z_{R4} = R_4; Z_{RB} = R_B; Z_{LB} = j\omega L_B; Z_{CBX} = \frac{-j}{\omega C_{BX}}; Z_{RLK} = R_K + j\omega L_K;$

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

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

$$I = \frac{I_{BE} - I_{BK}}{Q}, \quad (2)$$

$$I_{BE} = I_S \exp\left(\frac{U_{BE}}{NE \cdot V_t} - 1\right), \quad (3)$$

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

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

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:

$$Z = \frac{U_{\text{ж}}}{\frac{Z_{R2} + Z_{RLE}}{Z_{LB} - Z_{RLE}} \cdot \left[U_{\text{ж}} \left(\frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_{R3}} \right) - 2I_{BE} - I + I_{BK} - \frac{Z_{CBK} + Z_{CBX}}{Z_{CBK} \cdot Z_{CBX}} \left(U_{\text{ж}} \left(\frac{1}{Z_C + Z_L} - \frac{1}{Z_{R3}} \right) - I - I_{BK} \right) \right]} \quad (6)$$

Подставив в полученное выражение значение параметров эквивалентной схемы, получим числовое значение полного сопротивления $Z = -20 + j4,5$ кОм (для $U_{\text{ж}} = 8$ В). Теоретические и экспериментальные исследования показали, что активная составляющая полного комплексного сопротивления цепи принимает отрицательное значение, что подано на рис. 4. В свою очередь, реактивная составляющая полного комплексного сопротивления круга имеет емкостный характер (рис. 5).

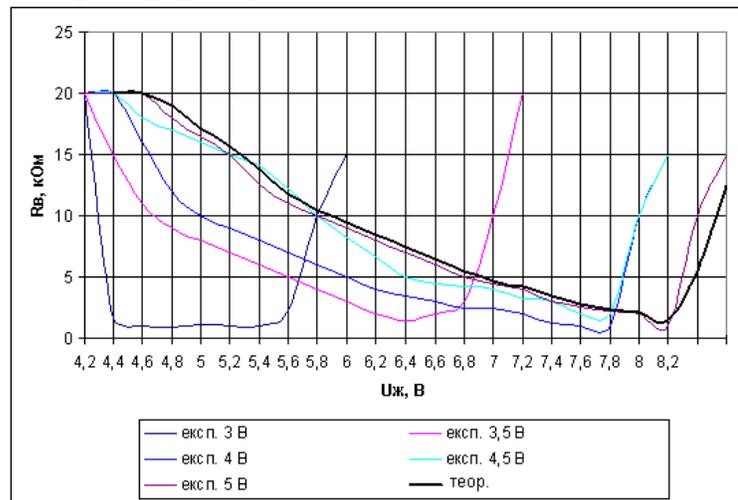


Рис. 4. Теоретическая и экспериментальная (при разных напряжениях управления 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) зависимости активной составляющей полного комплексного сопротивления от напряжения питания

Как видно из графика рис. 4, экспериментальная зависимость активной составляющей полного комплексного сопротивления от напряжения питания имеет вид кривой, которая спадает, а затем снова растет, в то время, как теоретическая растет и спадает почти по линейному закону.

Следует рис. 5, так он отображает то, что с увеличением напряжения питания реактивная составляющая полного комплексного сопротивления постепенно уменьшается (приблизительно до уровня 4 кОм).

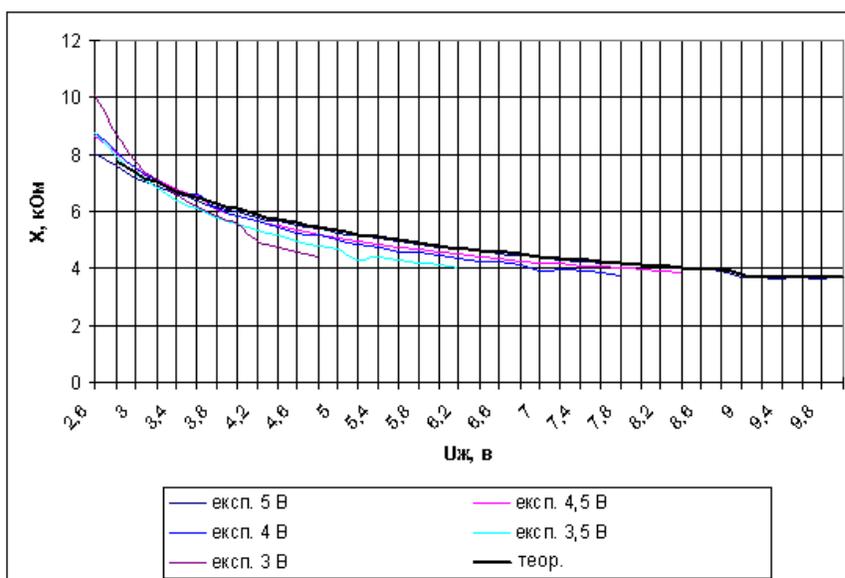


Рис. 5. Теоретическая и экспериментальная (при разных напряжениях управления 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) зависимости реактивной составляющей полного комплексного сопротивления от напряжения питания

Подключение пассивной индуктивности к выводам коллектор-коллектор структуры при отрицательных значениях полного комплексного сопротивления (при компенсации потерь энергии в колебательном контуре), позволяет создать генератор электрических колебаний. При воздействии изменения температуры на датчик осуществляется изменение активной и реактивной составляющей полного комплексного сопротивления, что в свою очередь, изменяет частоту генерации. Экспериментальная зависимость частоты генерации от напряжения питания представлена на рис. 6 и имеет практически линейный характер.

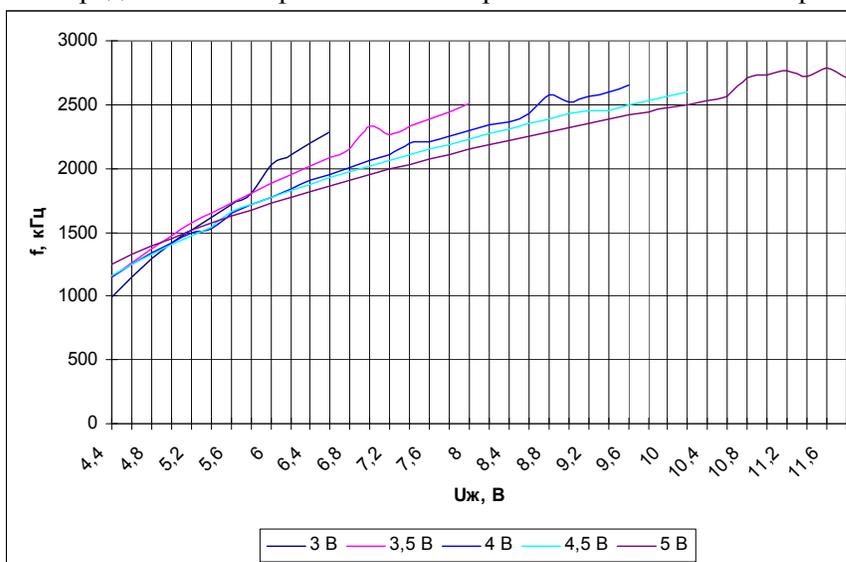


Рис. 6. Экспериментальная зависимость частоты генерации от напряжения питания

На рис. 7 подана экспериментальная зависимость частоты генерации от температуры (при разных напряжениях управления), которая имеет практически линейный характер. Причем, когда напряжение управления равно 3,5 В, то участок от 100°C до 240°C является наиболее стабильным, для напряжения управления 4,5 В наиболее стабильным является участок от 35°C к 180°C, а для 5 В – участок от 35°C к 160°C.

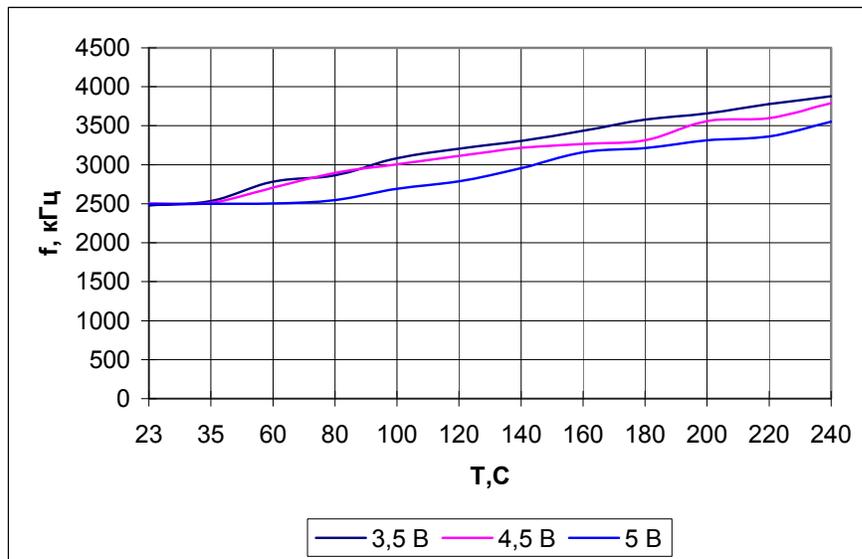


Рис. 7. Экспериментальная зависимость частоты генерации от температуры

Осуществив ряд исследований, проведя расчет цепи оптико-частотного температурного сенсора, было определено, что активная составляющая полного комплексного сопротивления принимает отрицательное значение, а реактивная имеет емкостный характер и зависит от напряжения питания. Установлен ряд взаимосвязей между частотой генерации и напряжением питания, частотой генерации и частотой генерации и температурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поскачей А. А., Чубаров Е. П. Оптико-электронные системы измерения температуры. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 246 с.
2. Осадчук В. С., Осадчук А. В., Кравчук Н. С. Микроэлектронные сенсоры температуры с частотным выходом. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2007. – 163 с.
3. Осадчук А. В. Микроэлектронные частотные преобразователи на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением. – 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, заведующий кафедрой радиотехники.

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

Деундяк Марина Владимировна – студентка факультета радиотехники и телекоммуникаций. Винницкий национальный технический университет.