

УДК: 621.382: 681.586.776

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; А. В. Осадчук, д. т. н., проф.; С. В. Барабан**РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ**

В статье представлен и описан радиоизмерительный преобразователь температуры на основе транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением, выполнен компьютерный эксперимент работы схемы устройства, определены функция преобразования и функция чувствительности радиоизмерительного преобразователя температуры, проведены экспериментальные исследования работы данного устройства температуры.

Ключевые слова: радиоизмерительный преобразователь температуры, терморезистор, автогенератор, вольт-амперная характеристика, функция преобразования, отрицательное сопротивление, измерение температуры.

Введение

Важной разновидностью измерительных преобразователей являются сенсоры температуры, поскольку многие процессы, в том числе и в повседневной жизни, регулируются температурой.

По оценкам отечественных и зарубежных специалистов, технические измерения температуры составляют соответственно 40 – 50% от общего количества всех измерений [1]. В частности, в Украине температурные и теплофизические измерения являются одними из наиболее распространенных и составляют 30% всего объема измерений [2]. Это обусловлено мощным промышленным и научно-техническим потенциалом страны с развитием таких доминирующих отраслей, как: металлургия, энергетика, машиностроение, авиационная и космическая техника, химическая промышленность и т. д., эффективная работа их во многом зависит от точности измерений температуры и теплофизических характеристик. Поэтому важными задачами современного приборостроения и современной измерительной техники является выбор надежных методов измерения температуры в различных производствах, создание измерительных приборов необходимой точности, стабильности и быстродействия, а также исследование влияния на результат измерений всей совокупности факторов, сопровождающих измерительный процесс.

Данная статья посвящена созданию и исследованию радиоизмерительного преобразователя температуры, действие которого основывается на функциональной зависимости импеданса полупроводниковых приборов от одной из наиболее распространенных неэлектрических величин – температуры, что представляет собой теоретический и практический интерес, а работу позволяет считать актуальной.

Схема устройства измерения температуры

Схема радиоизмерительного преобразователя температуры состоит из р-п-р-биполярного транзистора и двухзатворного п-канального МДП-транзистора, питание которых осуществляют источники постоянного напряжения U_1 и U_2 , пассивной индуктивности L , конденсатора C и чувствительного элемента – терморезистора TR (рис. 1).

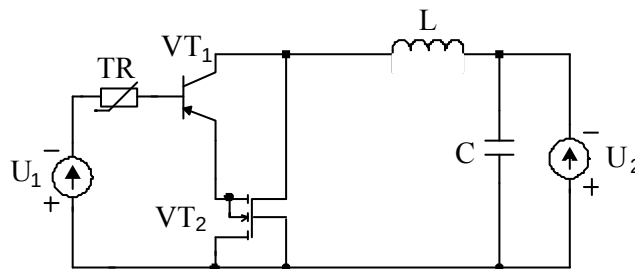


Рис. 1. Электрическая схема радиоизмерительного преобразователя температуры

Радиоизмерительный преобразователь температуры работает следующим образом. В начальный момент времени температура не действует на термочувствительный элемент TR. Повышением напряжения управляющих источников U_1 и U_2 до значения, когда на электродах коллектор – сток биполярного транзистора VT₁ и полевого транзистора VT₂ возникает отрицательное сопротивление, которое приводит к возникновению электрических колебаний в контуре, образованном последовательным включением полного сопротивления с емкостным характером на электродах коллектор – сток транзисторов VT₁ и VT₂ и индуктивным сопротивлением пассивной индуктивности L. Конденсатор C препятствует прохождению переменного тока через управляющий источник напряжения U_2 . При следующем действии температуры на термочувствительное сопротивление TR меняется его сопротивление, что приводит к изменению емкостной составляющей полного сопротивления на электродах коллектор – сток транзисторов VT₁ и VT₂, а это, в свою очередь, вызывает изменение резонансной частоты колебательного контура.

Моделирование радиоизмерительного преобразователя температуры

Для моделирования данного устройства воспользуемся пакетом программ Orcad Family Release 9.2. В качестве биполярного транзистора возьмем транзистор марки BC857, а в качестве полевого транзистора – BF998. В процессе моделирования преобразователя температуры стало ясно, что для образования отрицательного сопротивления в транзисторной структуре VT₁-VT₂ (рис. 1) необходимо использовать делитель напряжения, который мы и подсоединили в цепь первого затвора МДП-транзистора VT₂. На рис. 3 представлено окно программной среды Orcad Family Release 9.2 со схемой исследуемого устройства.

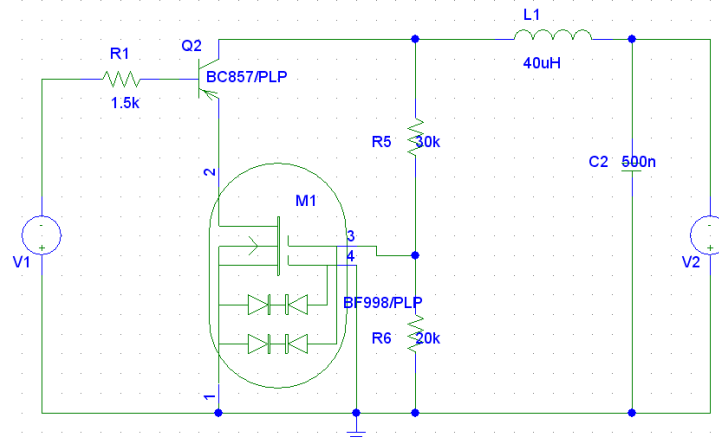


Рис. 3. Схема преобразователя температуры, составленная в Schematics

На рис. 4 представлено семейство вольт-амперных характеристик исследуемого устройства, полученных в результате моделирования в Orcad Family Release 9.2. Снизу вверх на рис. 4 ВАХ изменяются в зависимости от приложенного напряжения управления V_1 : нижняя характеристика снята при $V_1 = 1,5$ В, далее напряжение управления увеличивалось на 0,5 В до верхней характеристики, снятой при $V_1 = 3,5$ В.

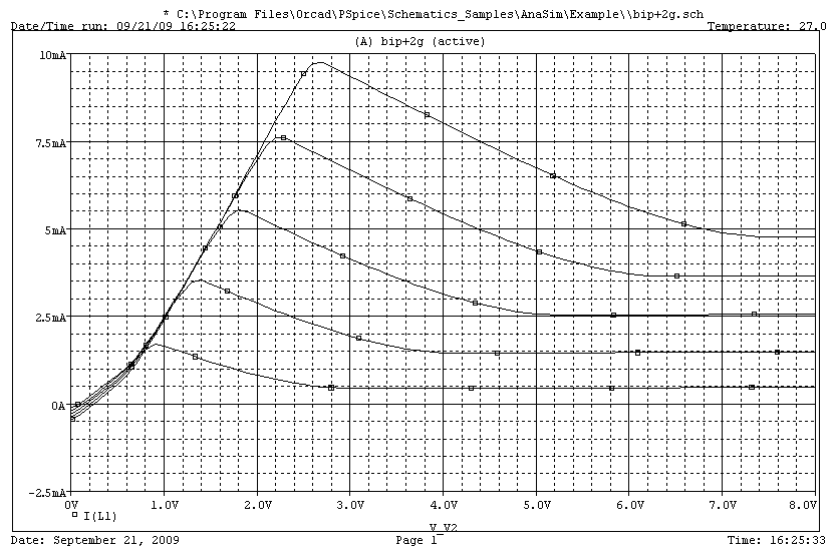


Рис. 4. ВАХ преобразователя температуры при различных значениях напряжения управления

На рис. 5 представлена зависимость изменения выходного тока во времени исследуемого преобразователя температуры, полученная в среде PSpice.

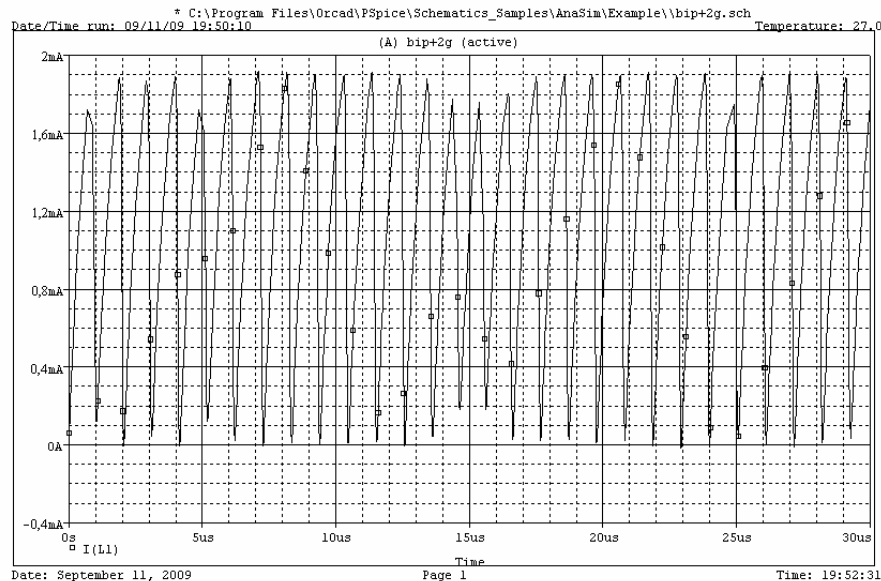


Рис. 5. Зависимость изменения выходного тока во времени преобразователя температуры, полученная в PSpice

Таким образом, моделирование радиоизмерительного преобразователя температуры (рис. 1) в Orcad Family Release 9.2 доказало возможность создания на практике данного устройства, а благодаря проведенному моделированию, стало ясно, какую элементную базу лучше использовать.

Определение функции преобразования радиоизмерительного преобразователя температуры

Для моделирования радиоизмерительного преобразователя температуры воспользуемся методом контурных токов. Полное сопротивление Z , активная часть которого имеет отрицательное значение, а реактивная – емкостный характер, определяется из преобразованной эквивалентной схемы устройства, представленной на рис. 6.

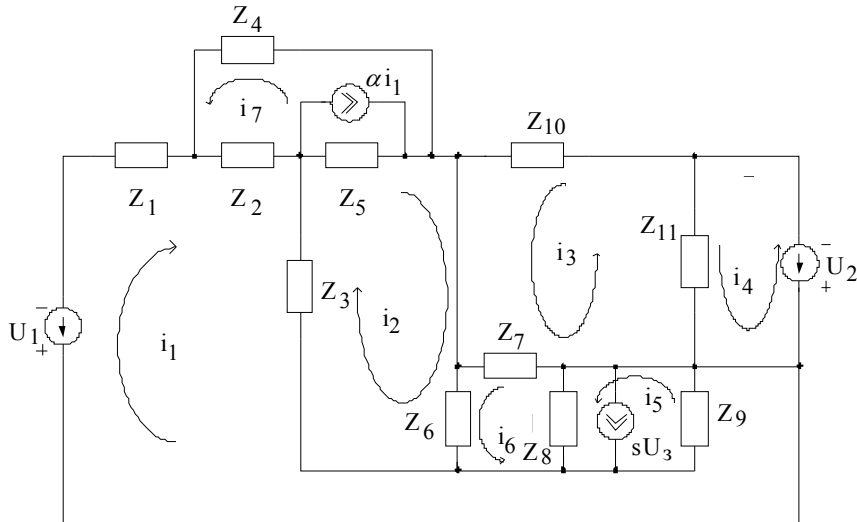


Рис. 6. Преобразованная эквивалентная схема преобразователя температуры

Согласно выбранным направлениям контурных токов система уравнений Кирхгофа имеет вид:

$$\begin{cases} U_1 = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_9) \cdot i_1 + Z_2 \cdot i_7 - Z_3 \cdot i_2 + Z_9 \cdot i_5 + Z_9 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2, \\ 0 = (Z_3 + Z_5 + Z_6) \cdot i_2 - Z_3 \cdot i_1 - Z_5 \cdot \alpha \cdot i_1 + Z_5 \cdot i_7 + Z_6 \cdot i_6, \\ 0 = (Z_7 + Z_{10} + Z_{11}) \cdot i_3 - Z_7 \cdot i_6 - Z_{11} \cdot i_4, \\ U_2 = Z_{11} \cdot i_4 - Z_{11} \cdot i_3, \\ 0 = (Z_8 + Z_9) \cdot i_5 - Z_8 \cdot i_6 - Z_8 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2 + Z_9 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2 + Z_9 \cdot i_1, \\ 0 = (Z_6 + Z_7 + Z_8) \cdot i_6 + Z_6 \cdot i_2 - Z_7 \cdot i_3 - Z_8 \cdot i_5 + Z_8 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2, \\ 0 = (Z_2 + Z_4 + Z_5) \cdot i_7 + Z_2 \cdot i_1 + Z_5 \cdot i_2 - Z_5 \cdot \alpha \cdot i_1, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_{TR}, Z_2 = R_b, Z_3 = \frac{R_e}{1 + (\omega C_e R_e)^2} - j \frac{R_e^2 \omega C_e}{1 + (\omega C_e R_e)^2}, Z_4 = \frac{1}{j \omega C_k}, Z_5 = R_k, \\ Z_6 &= \frac{R_{gs}}{1 + (\omega C_{gs} R_{gs})^2} - j \frac{R_{gs}^2 \omega C_{gs}}{1 + (\omega C_{gs} R_{gs})^2}, Z_7 = \frac{1}{j \omega C_{gd}}, Z_8 = R_{ds}, Z_9 = \frac{1}{j \omega C_{ds}}, \\ Z_{10} &= j \omega L_1, Z_{11} = \frac{1}{j \omega C_1}, \alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \left(\frac{f}{f_0} \right)^2}. \end{aligned}$$

α – комплексное значения коэффициента передачи по току, s – крутизна полевого транзистора.

Решение системы уравнений (1) выполняется методом Гаусса с частичным выбором главного элемента на персональном компьютере. Значения параметров эквивалентной схемы (рис. 6), необходимых для расчетов, получены из работ [3, 4].

Для определения функции преобразования необходимо найти зависимость частоты генерации от температуры. Это возможно сделать, решив систему уравнений Кирхгофа, составленную для переменного тока на основе эквивалентной схемы (рис. 6). Решение системы уравнений (1) позволяет получить величину полного сопротивления на электродах коллектор – сток преобразователя. При разделе полного сопротивления на действительную и мнимую составляющие, несложно определить эквивалентную емкость колебательного контура,

которая зависит от температуры. Функция преобразования в этом случае имеет вид:

$$F = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{R_{екв}(T) \cdot C_{екв}(T)} \sqrt{\frac{R_{екв}^2(T) \cdot C_{екв}(T)}{L}} - 1 \quad (2)$$

Чувствительность радиоизмерительного преобразователя температуры определяется по формуле:

$$S_{P_{випр}}^{F_0} = \frac{T}{F_0} \cdot \frac{dF_0}{dT} = -\frac{1}{2} \left[\frac{T}{C_{екв}(T)} \cdot \frac{dC_{екв}(T)}{dT} \right] \quad (3)$$

На рис. 7 представлены теоретические зависимости функции преобразования структуры с отрицательным сопротивлением на основе биполярного и полевого транзисторов, термочувствительным элементом которой является терморезистор.

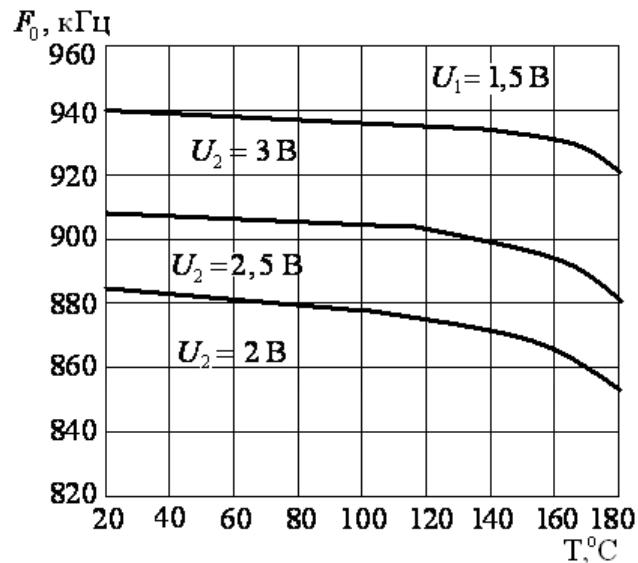


Рис. 7. Теоретическая зависимость частоты генерации от температуры

Экспериментальные исследования

При проведении экспериментальных исследований были использованы отечественные терморезисторы ММТ-1, МКТ-12 и зарубежный терморезистор фирмы Siemens (номиналом 1,5 кОм). Вместо МДП-транзистора BF 998 был использован отечественный двухзатворный n-канальный полевой транзистор марки КП 327АИ, что позволило отказаться от использования делителя напряжения R5, R6 (рис. 3).

Экспериментальная установка для исследования ВАХ преобразователя представлена на рис. 8. Во время проведения эксперимента использовались источники постоянного напряжения (ИПН) типа ВИП009, Б5-43, миллиамперметр типа УТ70В, вольтметры типа В7-35, значения параметров схемы: $R_T = 1,5$ кОм, сопротивление индуктивности L составлял 7 Ом, $C_1 = 470$ нФ.

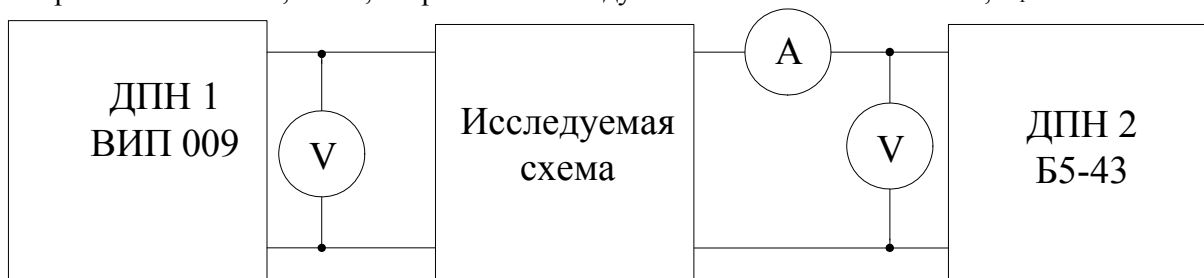


Рис. 8. Блок-схема измерительной установки для исследования ВАХ преобразователя

На рис. 9 представлены экспериментальные ВАХ частотного преобразователя температуры на основе БиМОН структуры с ОС (BC 557B и КП 327АБ).

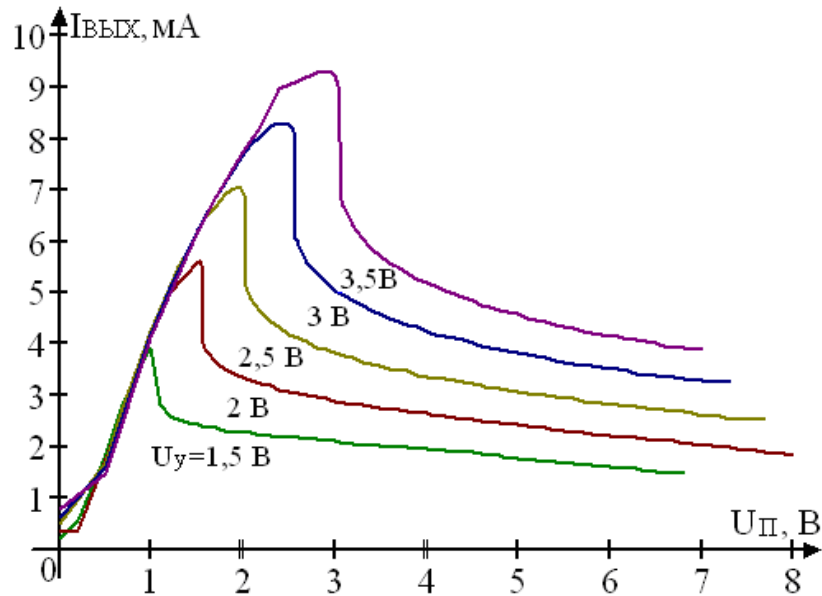


Рис. 9. Экспериментальные ВАХ частотного преобразователя температуры на основе транзисторов BC 557B и КП 327АБ

Экспериментальная установка для исследования частоты генерации преобразователя от температуры представлена на рис. 9. Во время проведения эксперимента использовались источники постоянного напряжения (ИПН) типа ВИП009, Б5-43, миллиамперметр типа УТ70В, вольтметры типа В7-35, частотомер электронносчетный ЧЗ-35, осциллограф С1-93, значения параметров схемы: $R1 = 1,5 \text{ кОм}$, индуктивность $L = 100 \text{ мкГн}$, $C1 = 450 \text{ нФ}$. Чувствительный элемент исследуемой схемы закреплялся в специально изготовленную контактную рамку и размещался в печи. Измерение температуры проводилось с помощью переносного пирометра типа «Смотрич-4ПМ1».

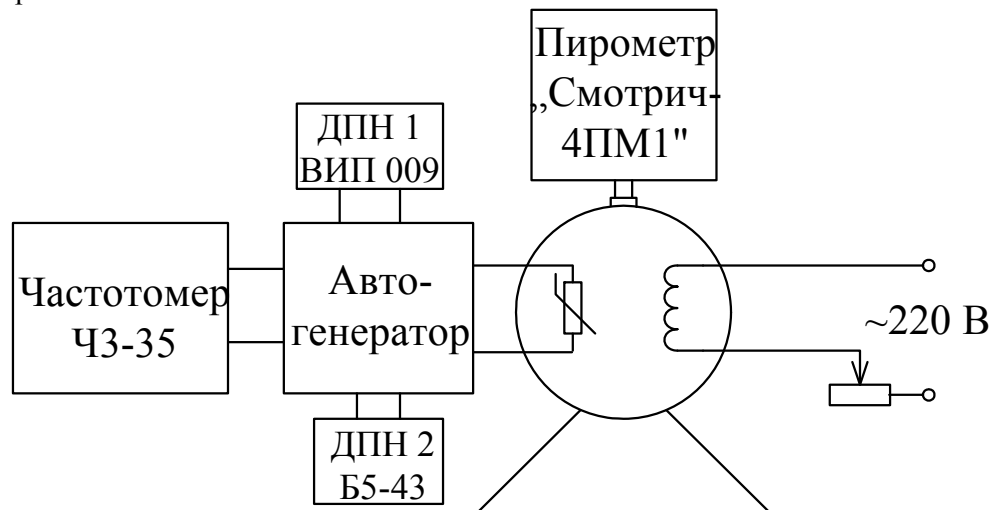


Рис. 10. Блок-схема измерительной установки для исследования зависимости частоты генерации от температуры

На рис. 11, 12 представлены экспериментальные зависимости частоты генерации от напряжения питания и напряжения управления соответственно.

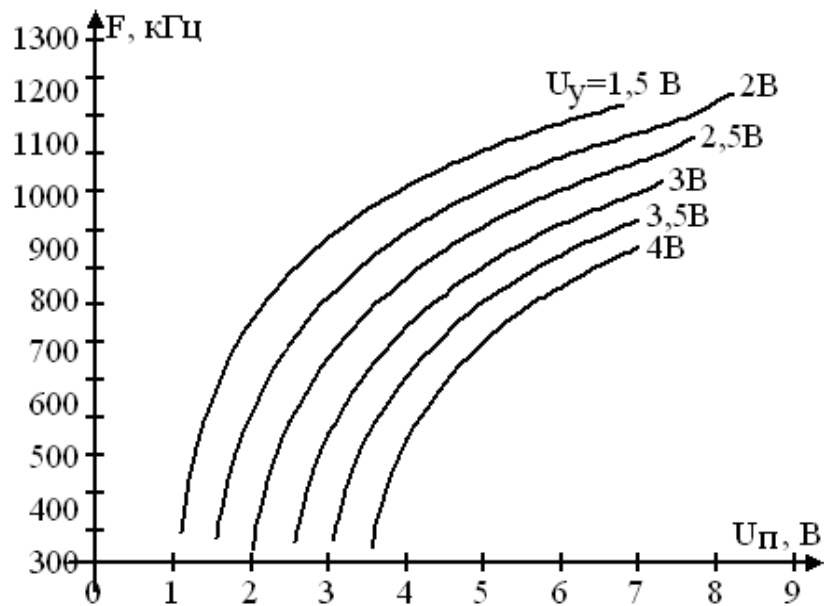


Рис. 11. Экспериментальная зависимость частоты генерации преобразователя температуры от напряжения питания

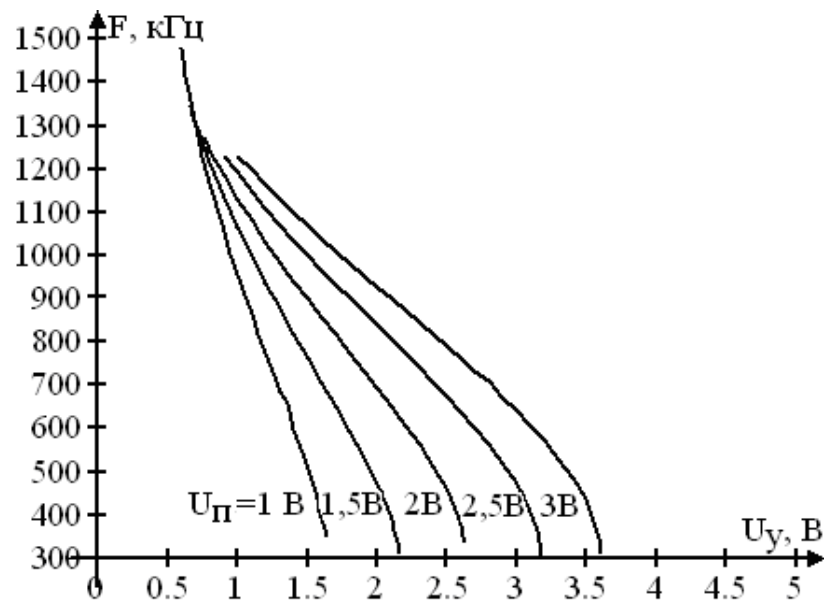


Рис. 12. Зависимость частоты генерации преобразователя температуры от напряжения управления

Выбор рабочей точки преобразователя осуществлялся на основе полученных характеристик зависимости частоты генерации устройства от напряжения питания и напряжения управления (рис. 11, 12).

На рис. 13 – 15 представлены экспериментальные зависимости частоты генерации при различных режимах питания от температуры для различных терморезисторов. Как видно из рисунка, оптимальным диапазоном рабочих температур является интервал от $+20^{\circ}\text{C}$ до 160°C .

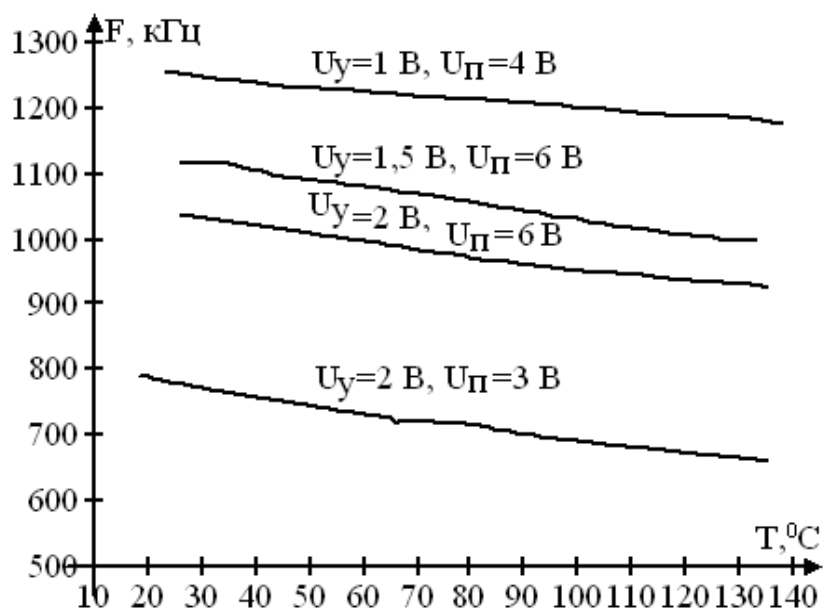


Рис. 13. Экспериментальная зависимость частоты генерации от температуры для преобразователя на основе терморезистора ММТ-1 (1,5 кОм)

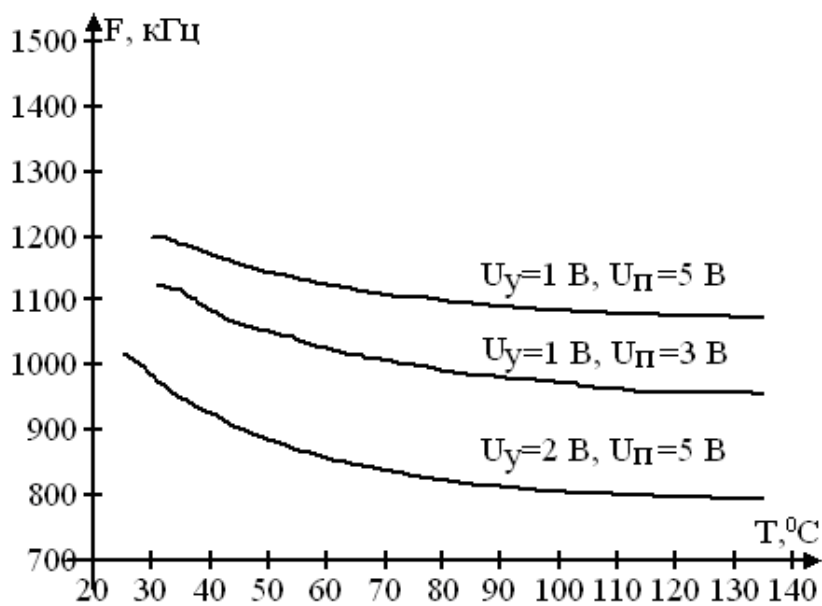


Рис. 14. Экспериментальная зависимость частоты генерации от температуры для преобразователя на основе терморезистора МКТ-12 (1,5 кОм)

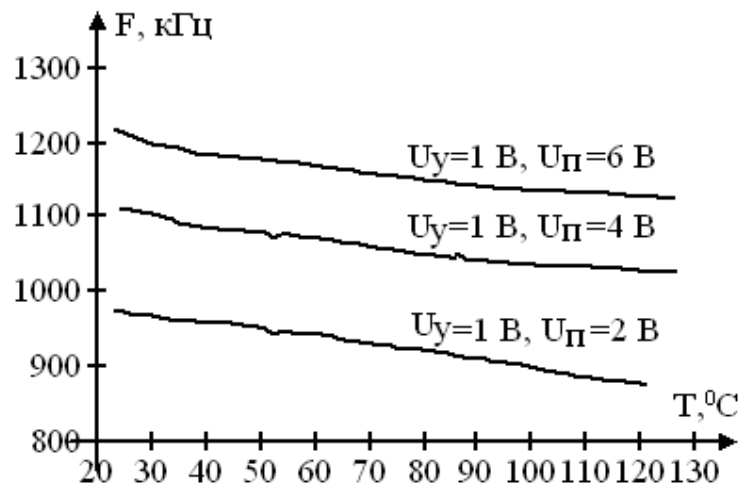


Рис. 15. Экспериментальная зависимость частоты генерации от температуры для преобразователя на основе терморезистора компании Siemens (1,5 кОм)

Итак, как видно из графиков зависимостей, полученных в результате экспериментальных исследований, для микроселектронного преобразователя температуры в качестве чувствительного элемента лучше всего использовать отечественный терморезистор ММТ-1.

Выводы

В данной статье выполнено моделирование радиоизмерительного преобразователя температуры в пакете программ Orcad Family Release 9.2. Методом контурных токов, по законам Кирхгофа, получены функция преобразования и функция чувствительности устройства. Проведены экспериментальные исследования, в результате чего получено семейство ВАХ, частотные зависимости от режима питания, зависимость частоты генерации преобразователя от температуры для различных чувствительных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виглеб Т. Датчики / Т. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
2. Гоц Н. Є. Сучасні проблеми інформаційної підтримки оптичної пірометрії / Н. Є. Гоц // Актуальні проблеми економіки. – 2006. – №10. – С. 45 – 51.
3. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000. – 303 с. – ISBN 966-7199-99-1.
4. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ / В. Д. Разевиг. – М.: Радио и связь, 1992. – 72 с.

Осадчук Владимир Степанович – д. т. н., профессор, e-mail: osadchuk69@mail.ru.

Осадчук Александр Владимирович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой радиотехники, e-mail: osadchuk69@mail.ru.

Барaban Сергей Владимирович – аспирант кафедры радиотехники, e-mail: akakieva@gmail.com. Винницкий национальный технический университет.