

4. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Осадчук О.В. – Вінниця : Універсам-Вінниця, 2000. – 303 с.
5. Філінюк М.А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багатоелектродних напівпровідникових структур Шоттки : [монографія] / Філінюк М.А., Куземко О.М., Ліщинська Л.Б. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 274 с.
6. G.D. Vendelin. Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques / G.D. Vendelin, A.M. Pavio, U.L. Rohde // Wiley Interscience. – 2005. – pp. 1057
7. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем / Буков В.Н. – Калуга : Изд-во научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.
8. Микросхемы. Транзисторы. Тиристоры. Диоды+SMD. Наука и техника. – СПб., 2008. – С. 432.

Надійшла 22.11.2011 р.
Рецензент: д.т.н. Білинський Й.Й.

УДК 621.382: 681.586.776

О.В. ОСАДЧУК, С.В. БАРАБАН, А.О. СЕМЕНОВ
Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Представлено теоретичні та експериментальні дослідження автогенераторного засобу для визначення фазових перетворень на основі піроструктури і транзисторної структури з від'ємним опором (ТСВО), показана можливість побудови приладів диференційно-термічного аналізу (ДТА) на основі перетворювачів данного класу, запропоновано використовувати метод змінного стану для дослідження схем АВП на основі ТСВО.

The theoretical and experimental studies of the autogenerator converter for phase transition definition based on ferroelectric structure and transistor structure with negative resistance (TSNR) are presented, the possibility of constructing devices of DTA with such measuring transducers is shown, method of variable condition for research oscillators schemes based on TSNR is suggested to use.

Ключові слова: диференційно-термічний аналіз (ДТА), автогенераторний вимірювальний перетворювач (АВП) для визначення фазових перетворень, частотний перетворювач температури, транзисторна структура з від'ємним опором (ТСВО), метод змінних стану, функція перетворення.

Вступ

При визначенні складу твердих матеріалів термоаналітичними методами першочергове значення займає вимірювання температури фазових перетворень і побудова термограм, якість яких постійно підвищується з розвитком технічних засобів реєстрації температури [1]. У багатьох випадках необхідно здійснювати вимірювання температури фазових перетворень тугоплавких металів, аморфних напівпровідників, об'єктів, які знаходяться у агресивному середовищі. Для цього доцільно використовувати безконтактні методи теплової реєстрації температури фазових перетворень, зокрема вимірювання та реєстрацію температури за випромінюванням.

На основі проведеного авторами аналізу пірометричних засобів для визначення фазових перетворень [2] встановлено, що існуючі засоби мають ряд недоліків. До основних з них можна віднести низьку точність визначення, низьку чутливість визначення, інерційність і високу собівартість пристроїв. Забезпечення високої точності визначення фазових перетворень залишається актуальною задачею диференційно-термічного аналізу.

Таким чином, в результаті проведеного критеріального аналізу інформативної ефективності пірометричних засобів визначення фазових переходів для підвищення точності, чутливості, розширення діапазону вимірювань, підвищення швидкодії, зниження собівартості пристроїв є доцільним вибрати для подальших досліджень спосіб диференційно-термічного аналізу на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

Постановка завдання

Метою статті є розробка математичної моделі автогенераторного засобу для визначення фазових перетворень твердих матеріалів в часовій області, на основі якої отримати зміну напруг і струмів в часі, залежність частоти генерації та чутливості пристрою від температури фазових перетворень твердих матеріалів.

Об'єктом дослідження статті є процес перетворення температури фазового переходу твердого матеріалу у частотний сигнал в чутливих напівпровідникових структурах.

Предметом дослідження статті є динамічні характеристики автогенераторного засобу для визначення фазових перетворень твердих матеріалів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

Засіб для визначення фазових перетворень твердих матеріалів

Найпростішим варіантом для визначення фазових перетворень речовин є прилади вимірювання диференційної температури з подальшою її реєстрацією в часі. При розробці приладів для визначення

фазових перетворень необхідно одночасно вимірювати дві температури – зразка і еталона з подальшою операцією віднімання отриманих значень температур.

В наш час активного розвитку цифрової техніки для диференційно-термічного аналізу все частіше використовують мікропроцесорну техніку [3]. Одним з найпростіших методів для знаходження диференціальної температури є використання можливостей мікроконтролера. На базі МК PIC 18F4550 було організовано два лічильники імпульсів, один з яких підраховує імпульси, що приходять від автогенераторного вимірювального перетворювача температури зразка, інший лічильник підраховує імпульси, що приходять від АВП температури еталону. Потім програмно відбувається віднімання результатів підрахунку та подальша обробка результату вимірювання для представлення його у формі, зручній для користувача. На рис. 1 представлено електричну схему даного приладу визначення фазових перетворень.

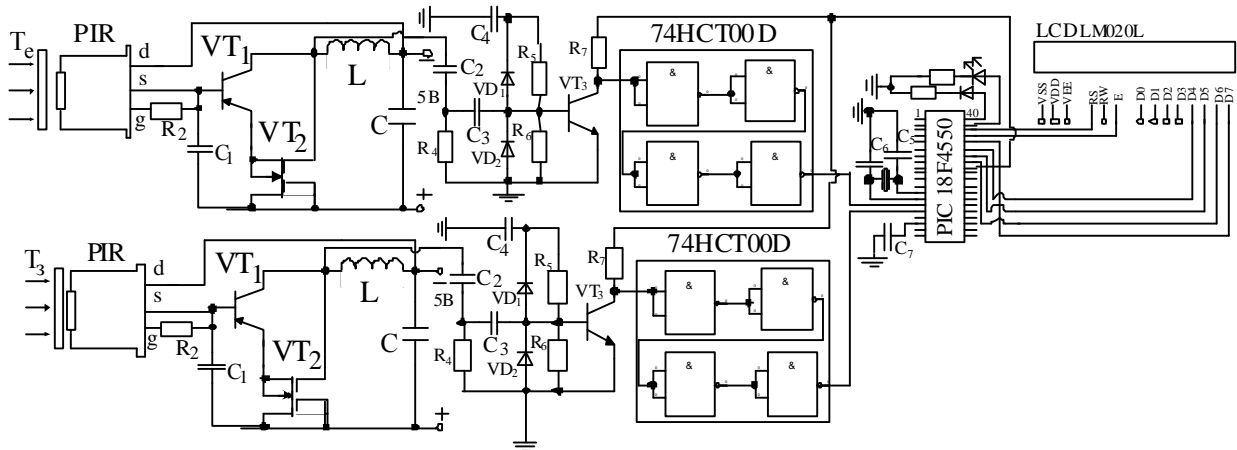


Рис. 1. Електрична схема автогенераторного приладу для визначення фазових перетворень на МК

В основі роботи приладу на рис. 1 лежить використання автогенераторного вимірювального перетворювача на основі транзисторної структури з від'ємним опором. Розглянемо будову даного пристрою більш детально. На рис. 2 представлена електрична схема частотного перетворювача температури на основі піроструктури.

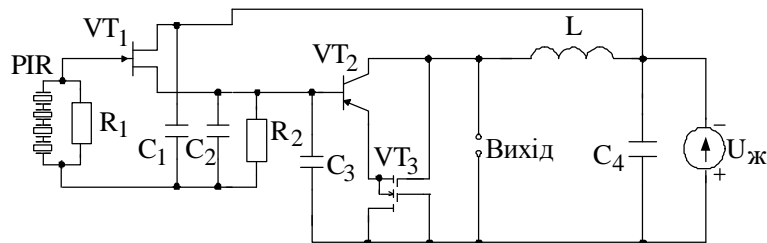


Рис. 2. Електрична схема частотного перетворювача температури на основі піроструктури і Бі-МОН структури з ВО для визначення фазових перетворень

Робота пристрою базується на основі автогенератора, утвореного транзисторною структурою VT_2 і VT_3 і індуктивністю L . Коливання в автогенераторі на рис. 2 утворюються завдяки позитивному зворотному зв'язку, який виникає в Бі-МОН напівпровідниковій структурі і призводить до появи ділянки з від'ємним диференціальним опором на вольт-амперній характеристиці пристрою.

Математична модель автогенераторного вимірювального перетворювача для визначення фазових перетворень твердих матеріалів

Скористаємось методом змінних стану для моделювання автогенераторного вимірювального перетворювача для визначення фазових перетворень твердих матеріалів на основі транзисторної структури з від'ємним опором (рис. 2).

Еквівалентна схема перетворювача представлена на рис. 3. Складаємо схему, в якій ємності і індуктивності змінені ідеальними джерелами (рис. 4). Направлення введених джерел $U_{ck}(t)$, $U_{cds}(t)$, $U_{cp}(t)$, $i_L(t)$ узгоджене з позитивним напрямком для змінних стану. При цьому напрями ЕРС $u_C(t)$ зворотні напрями струму $i_C(t)$, а напрями джерел струму $i_L(t)$ співпадають з $u_L(t)$. Оскільки в перетвореній еквівалентній схемі рис. 4 немає жодного контуру з джерел напруги або розрізу з джерел струму, переходимо до другого етапу.

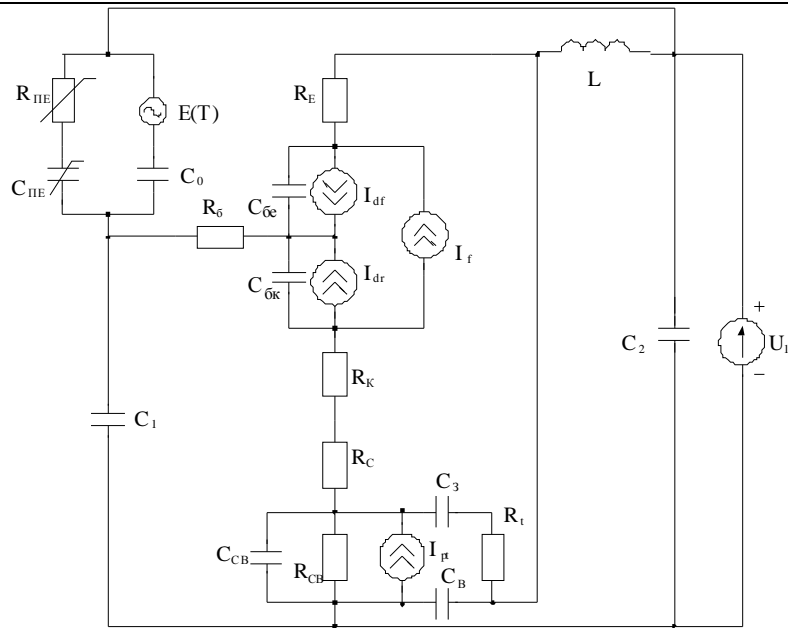


Рис. 3. Еквівалентна схема перетворювача температури

В еквівалентній схемі використано такі позначення: U_1 – джерело живлення; R_1 – внутрішній опір джерела живлення; L – пасивна індуктивність; C_{PE} – нелінійна ємність піроелектричної структури; C_0 – ємність піроструктури; R_{PE} – опір піроелектричної структури; $E(T)$ – джерело е.р.с. піроелектричної структури; C_1, C_2 – схемотехнічні ємності; елементи еквівалентної схеми біполярного транзистора: R_B, R_E, R_K – об’ємні опори бази, емітера і колектора; $C_{\delta e}, C_{\delta k}$ – ємності емітера та колектора; I_f – нелінійне джерело прямого струму біполярного транзистора; I_{df}, I_{dr} – струми внутрішніх переходів транзистора; елементи еквівалентної схеми польового транзистора: R_C, R_{CB}, R_t – опори стоку, витоку та стік-витік; C_C, C_{CB}, C_3 – ємності стоку, витоку та стік-витік; I_{pt} – нелінійне джерело струму польового транзистора.

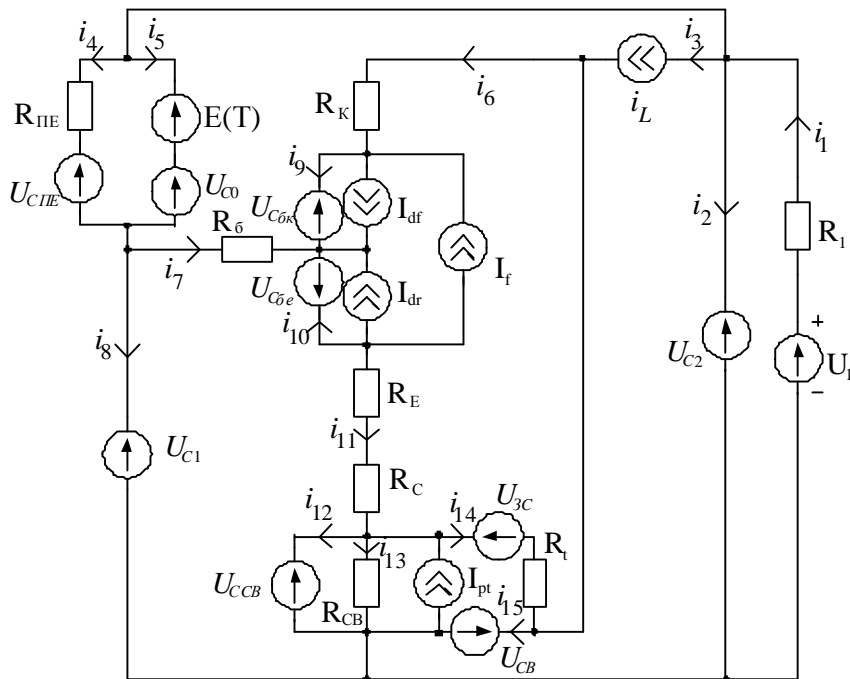


Рис. 4. Перетворена еквівалентна схема частотного перетворювача

Тепер необхідно визначити струми через введенні джерела напруги ($i_c(t)$) та напруги на введених джерелах струму ($U_L(t)$). Для цього необхідно розв’язати систему рівнянь для кола рис. 4, що складена за законами Ома і Кірхгофа і містить похідні змінних стану:

$$\begin{aligned}
i_L(t) + \frac{dU_{c ds}}{dt} &= i_{15}(t) + i_6(t); \\
i_6(t) + I_f &= i_9(t) + I_{df}; \\
\frac{dU_{ck}}{dt} + i_{11}(t) + I_{dr} + I_f &= 0; \\
i_{11}(t) + I_{pt} &= i_{12}(t) + i_{13}(t) + \frac{dU_{c ds}}{dt}; \\
i_{Rpp}(t) + \frac{dU_{cp}}{dt} + i_5(t) &= i_7(t) + i_8(t); \\
i_8(t) + i_{12}(t) + i_{13}(t) + i_{15}(t) &= I_{pt} + i_1(t); \\
i_6(t) &= \frac{1}{R_{ee}} (U_{cv}(t) - (U_{ccv}(t) + i_{11}(t) \cdot (R_k + R_c) - U_{cbk}(t) + U_{cbe}(t))); \\
i_7(t) &= \frac{1}{R_b} (dU_{c1}(t) - (U_{CCV}(t) + i_{11}(t) \cdot (R_k + R_c) - U_{cbk}(t))); \\
U_L(t) &= dU_3 - U_{CV}(t); \\
\frac{dU_{c ds}}{dt} &= \frac{(U_{CCV}(t) - U_{CZ}(t)) - U_{CV}(t)}{R_t}; \\
\frac{dU_{cp}}{dt} &= \frac{U_{c0}(t) + E_T - U_{cpe}(t)}{R_{pe}}; \\
i_{Rpp}(t) &= \frac{U_{c0}(t) + E_T}{R_{pp}}; \\
i_1(t) &= \frac{\frac{di_L}{dt} - dU_3}{R_1}; \\
i_5(t) &= i_1(t) - \left(i_L(t) + i_{Rpp}(t) + \frac{dU_{cp}}{dt} \right); \\
i_{13}(t) &= \frac{U_{CCV}(t)}{R_{CV}}.
\end{aligned} \tag{1}$$

Отримана система рівнянь є нелінійною, оскільки містить в якості складових елементів нелінійні залежні джерела струмів I_{pt} , I_{bit} , I_{df} , I_{dr} . Формули для обрахунку нелінійних параметрів представлені в [4].

Обрахунок системи (3) показує, що при застосуванні даної моделі на виході схеми будуть існувати періодичні коливання. На рис. 5 показані змодельовані вихідні коливання ($t=0\dots 10$ мкс) при параметрах, наведених в [5]. Розрахунок показує, що частота коливань залежить від зміни температури середовища

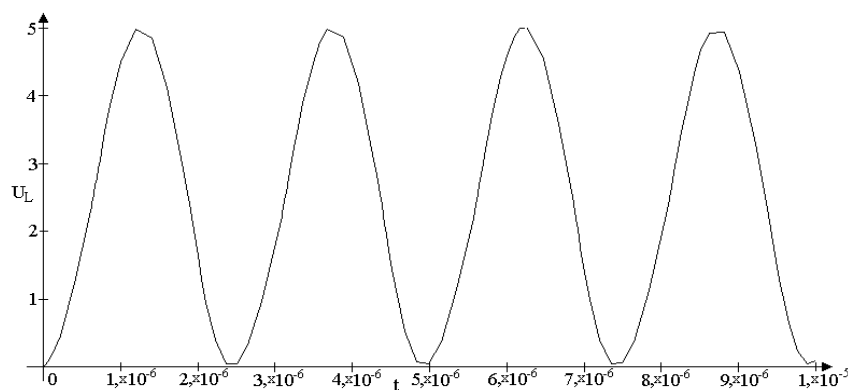


Рис. 5. Змодельовані вихідні коливання автогенераторного вимірювального перетворювача для визначення фазових перетворень

Для перевірки розробленої моделі було створено програму розрахунку вихідної частоти генерації

від величини температури, яка діє на чутливий елемент на мові пакету програм Maple. Таким чином, знаходячи вихідну частоту F при кожному значенні температури T можна побудувати функцію перетворення $F = f(T)$.

На рис. 6 наведено графіки функції перетворення в динамічному режимі методом змінних стану і отриманої експериментальними дослідженнями.

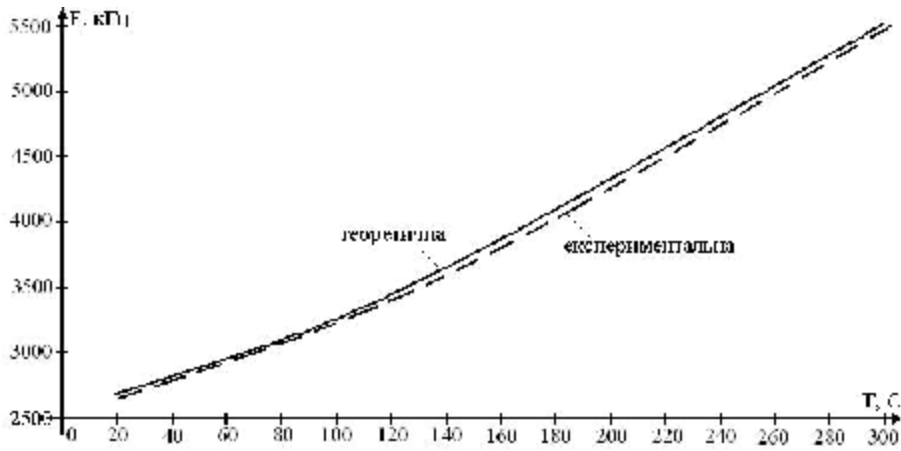


Рис. 6. Розрахункова і експериментальна функції перетворення автогенераторного вимірювального перетворювача на основі піроелектричної структури для визначення фазових перетворень

Знайдемо аналітичний вираз функції перетворення для даного вимірювального перетворювача. Для цього зкористаємось методом Ляпунова [4]. Скориставшись нелінійною еквівалентною схемою перетворювача температури на основі піроелектричної структури на рис. 3, на основі метода Ляпунова отримали:

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(C_{\delta k} + C_{ПЕ}(T) + C_0) - C_0 C_{ПЕ}(T) C_{\delta k} (R_{ПЕ}(T) + R_{\delta} + R_k)}{C_{ПЕ}(T) C_0 C_{\delta k} L_{екв}}} \cdot p \quad (2)$$

Чутливість вимірювального перетворювача на основі піроелектричної структури визначається з виразу (2) як перша похідна функції перетворення за температурою:

$$S_T = \frac{1}{4p} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{2(C_{\delta k} + C_{ПЕ}(T) + C_0) - C_0 C_{ПЕ}(T) C_{\delta k} (R_{ПЕ}(T) + R_{\delta} + R_k)}{C_{ПЕ}(T) C_0 C_{\delta k} L_{екв}}}} \right) \cdot \left(\frac{1}{C_{ПЕ}(T) C_0 C_{\delta k} L_{екв}} \times \right. \\ \left. \times \left(2 \frac{dC_{ПЕ}(T)}{dT} - C_0 \frac{dC_{ПЕ}(T)}{dT} C_{\delta k} (R_{ПЕ}(T) + R_{\delta} + R_k) - C_0 C_{ПЕ}(T) D(C_{\delta k}) (R_{ПЕ}(T) + R_{\delta} + R_k) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{dR_{ПЕ}(T)}{dT} \right) - \frac{2(C_{\delta k} + C_{ПЕ}(T) + C_0) - C_0 C_{ПЕ}(T) C_{\delta k} (R_{ПЕ}(T) + R_{\delta} + R_k) \frac{dC_{ПЕ}(T)}{dT}}{C_{ПЕ}(T)^2 C_0 C_{\delta k} L_{екв}} \right) \quad (3)$$

На основі аналітичного виразу для чутливості автогенераторного вимірювального перетворювача визначення фазових перетворень можна знайти графічне відображення, що надане на рис. 7.

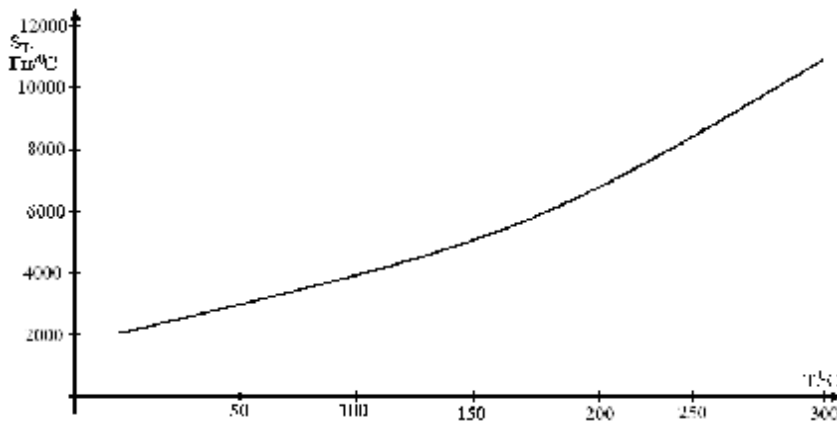


Рис. 7. Залежність чутливості автогенераторного вимірювального перетворювача від температури

На рис. 8 показана вольт-амперна характеристика розробленого вимірювального перетворювача.

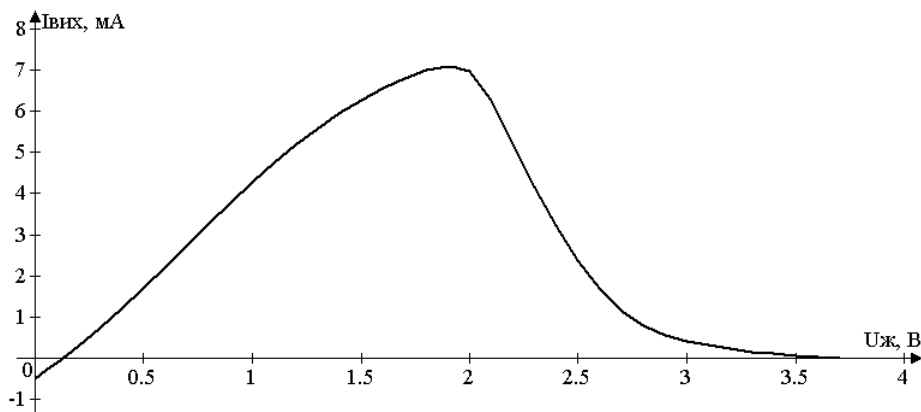


Рис. 8. Експериментальна ВАХ вимірювального перетворювача для визначення фазових перетворень на основі піроструктури

Результати досліджень

З розробленої математичної моделі автогенераторного засобу для визначення фазових перетворень твердих матеріалів видно, що зі зміною температури від 20 °С до 300 °С, чутливість пристрою змінюється від 2000 до 12000 Гц/°С.

Висновки

1. Розроблено високочутливий пристрій для визначення фазових перетворень на основі піроструктури з чутливістю від 2000 до 12000 Гц/°С і амплітудою вихідного сигналу 2,5 В.

2. Вперше розроблено математичну модель автогенераторного засобу для визначення фазових перетворень твердих матеріалів, яка, на відміну від існуючих, виконана в часовому домені, що надало можливість визначати зміну величини вихідного струму і напруги в часі.

3. У результаті математичного моделювання отримано аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості розробленого автогенераторного вимірювального перетворювача на основі піроструктури, які можуть бути використані для інженерного розрахунку автогенераторних приладів для визначення фазових перетворень.

Розбіжність теоретичних та експериментальних даних складає $\pm 5\%$.

Література

1. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы : [учебник для вузов] / Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. – 2-е издание, перераб. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.
2. Осадчук В.С. Аналіз методів вимірювання температури на основі піроелектриків / О.В. Осадчук, С.В. Барабан, О.М. Ільченко // Матеріали 4-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Современные научные достижения». – 2008. –Т. 17. – С. 3–11.
3. Фесенко А.И. Методы и приборы технического диагностирования тепловой защиты и радиопоглощающих покрытий авиационно-космических аппаратов / И.Н. Ищук, В.В. Штейнбрехер– М. : «Машиностроение», 2008. – 200 с.
4. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Модели компонент аналоговых устройств. – М. : Радио и связь, 1992. – Вып. 2. – 120 с.
5. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / Степаненко И.П. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1973. – 608 с.

Надійшла 3.12.2011 р.
Рецензент: д.т.н. Кучерук В.Ю.