

УДК 621.382

О.В. ОСАДЧУК, С.В. БАРАБАН, О.М. ЖАГЛОВСЬКА, Р.І. БЕЗНОСЮК

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СЕНСОРУ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ СТРУКТУРИ МЕТАЛ-ПІРОЕЛЕКТРИК-НАПІВПРОВІДНИК

*Вінницький національний технічний університет,  
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна,  
Тел.: (0432)-598-719, E-mail: serg@politex.org.ua*

**Анотація.** Розроблено математичну модель сенсору теплового випромінювання на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник з від'ємним опором, що дозволило отримати його статичну метрологічну характеристику, залежність функції перетворення від температури, зміну вихідної напруги пристрою з часом.

**Annotation.** The mathematical model of the thermal radiation sensor on the basis of structure of metal-pyro-electricities-semiconductor with negative resistance is developed. It gives possibility to get him static metrological characteristics, dependence of conversion function on a temperature, change in the output voltage of the device over time.

**Аннотация.** Разработана математическая модель сенсора теплового излучения на основе структуры металл-пирозелектрик-полупроводник с отрицательным сопротивлением, что дало возможность получить его статическую характеристику, зависимость функции преобразования от температуры, изменение выходного напряжения прибора со временем.

**Ключові слова:** частотний перетворювач, теплове випромінювання, піроелектрик, функція перетворення, від'ємний опір.

### ВСТУП

При визначенні складу твердих речовин 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 контроль та реєстрацію температури за випромінюванням.

Одним з напрямків розвитку наукових досліджень у цьому напрямку для поліпшення параметрів засобів визначення фазових перетворень твердих речовин є застосування реактивних властивостей і від'ємного опору для побудови інтегральних частотних перетворювачів. Цей напрямок досліджень базується на досягненнях наукової школи Вінницького національного технічного університету в розробці і дослідженні теоретичних основ реактивних властивостей і від'ємного опору у напівпровідникових приладах, що подано у монографіях д.т.н., проф. В.С. Осадчука [2], теоретичні дослідження і розробка перетворювачів температури проведено д.т.н., проф. О.В. Осадчуком [3].

Таким чином постає необхідність розробки теоретичних засад створення сенсорів теплового випромінювання на основі піроелектричних структур [4], а також актуальною задачею є розробка нових схем, дослідження їх математичних моделей, отримання метрологічних характеристик, проведення експериментальних досліджень.

Дана стаття присвячена розробці математичної моделі сенсору теплового випромінювання на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник. Метою роботи є підвищення чутливості засобів для визначення фазових перетворень твердих речовин за допомогою використання реактивних властивостей напівпровідникових структур. Об'єктом дослідження є процес перетворення температури у частотний сигнал в чутливих напівпровідникових структурах. Предметом дослідження є статичні та динамічні характеристики сенсору теплового випромінювання на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СЕНСОРУ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ СТРУКТУРИ МЕТАЛ-ПІРОЕЛЕКТРИК-НАПІВПРОВІДНИК**

Проведемо математичне моделювання вимірювального перетворювача для визначення фазових перетворень на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник (рис. 1).

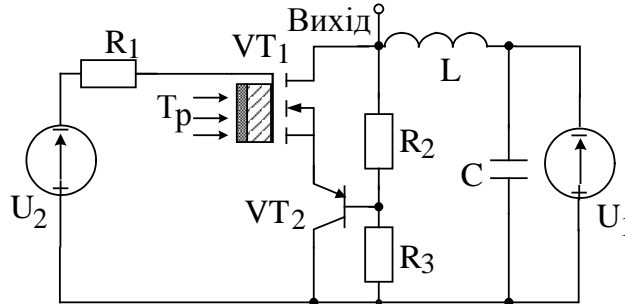


Рис. 1. Електрична схема автогенераторного перетворювача на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник [96]

Для моделювання автогенераторного вимірювального перетворювача визначення фазових переходів використовуємо метод змінних стану.

Еквівалентна схема перетворювача представлена на рис. 2. Складаємо схему, в якій ємності і індуктивності змінені ідеальними джерелами (рис. 3). Направлення введених джерел  $U_{ck}(t)$ ,  $U_{cds}(t)$ ,  $U_{cp}(t)$ ,  $i_L(t)$  узгоджене з позитивним напрямком для змінних станів. 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. 3 немає жодного контуру з джерел напруги або розрізу з джерел струму, переходимо до другого етапу.

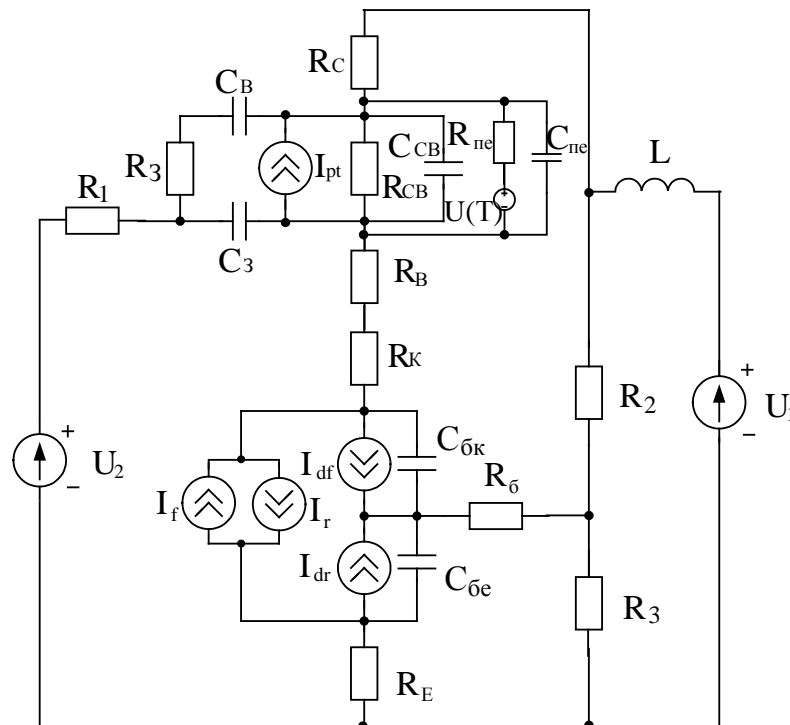


Рис. 2. Еквівалентна схема перетворювача теплового випромінювання

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.

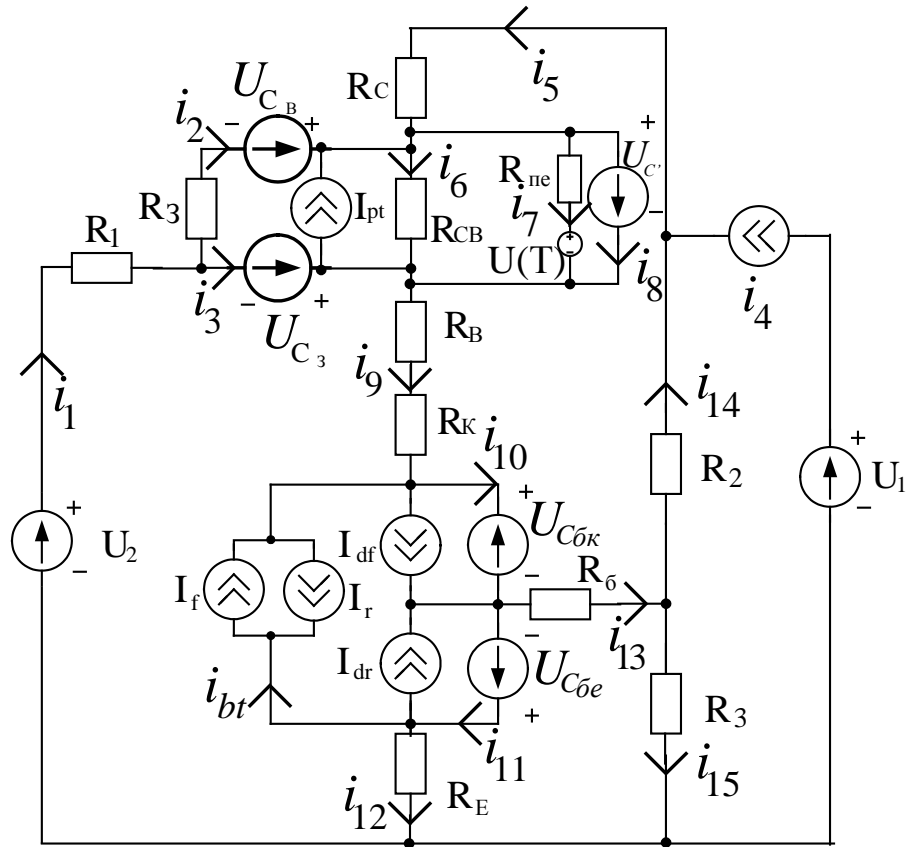


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема частотного перетворювача

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. 3, що складена за законами Ома і Кірхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 i_1 = i_2 + i_3; \\
 I_{pt} + i_9 = i_6 + i_7 + i_8; \\
 i_6 + i_7 + i_8 = I_{pt} + i_9; \\
 i_5 = i_4 + i_{14}; \\
 i_{14} + i_{15} = i_{13}; \\
 i_1 = i_{12} + i_{15}; \\
 I_{dr} + i_{bt} + i_2 = i_{11}; \\
 i_{13} + i_{11} = I_{df} + I_{dr} + i_{10}; \\
 i_1 R_1 + i_9 (R_B + R_K) + i_{12} R_e = U_2 + U_{C3} - U_{C\delta k} + U_{C\delta e}; \\
 U_1 + U_L = i_{15} R_3 - i_{14} R_2; \\
 U_{C\delta e} = i_{12} R_e - i_{15} R_3 - i_{13} R_{\delta}; \\
 U_{C\delta k} + U_C' = -i_9 (R_B + R_K) - i_5 R_e - i_{14} R_2 - i_{13} R_{\delta}; \\
 U_{CB} - U_{C'} - U_{C3} = i_2 R_3; \\
 U(T) - U_{C'} = -i_7 R_{ПЕ}; \\
 U(T) = i_6 R_{CB} - i_7 R_{ПЕ}
 \end{array} \right. \quad (1)$$

З іншого боку:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 i_{cp} = \frac{dU_{cp}}{dt} \\
 U_L = \frac{di_L}{dt} \\
 i_{cds} = \frac{dU_{cds}}{dt} \\
 i_{ck} = \frac{dU_{ck}}{dt}
 \end{array} \right. \quad (2)$$

Виконаємо заміну в лівій частині системи рівнянь (1) змінних на похідні змінних стану (2). Запишемо систему рівнянь станів в упорядкованій формі:

$$\begin{aligned}
 i_6(t) + I_f &= i_9(t) + I_{df} \\
 \frac{dU_{ck}}{dt} + i_{11}(t) + I_{dr} + I_f &= 0 \\
 i_{11}(t) + I_{pt} &= i_{12}(t) + i_{13}(t) + \frac{dU_{cds}}{dt} \\
 i_{Rpp}(t) + \frac{dU_{cp}}{dt} + i_5(t) &= i_7(t) + i_8(t) \\
 i_8(t) + i_{12}(t) + i_{13}(t) + i_{15}(t) &= I_{pt} + i_1(t) \\
 i_6(t) &= \frac{1}{R_{ee}}(U_{cv}(t) - (U_{ccv}(t) + i_{11}(t) \cdot (R_k + R_c) - U_{cbk}(t) + U_{cbe}(t))) \\
 i_7(t) &= \frac{1}{R_b}(dU_{c1}(t) - (U_{CCV}(t) + i_{11}(t) \cdot (R_k + R_c) - U_{cbk}(t))) \\
 U_L(t) &= dU_{\zeta} - U_{CV}(t) \\
 \frac{dU_{cds}}{dt} &= \frac{(U_{CCV}(t) - U_{CZ}(t)) - U_{CV}(t)}{R_t} \\
 \frac{dU_{cp}}{dt} &= \frac{U_{c0}(t) + E_T - U_{cpe}(t)}{R_{pe}} \\
 i_{Rpp}(t) &= \frac{U_{c0}(t) + E_T}{R_{pp}} \\
 i_1(t) &= \frac{\frac{di_L}{dt} - dU_{\zeta}}{R_1} \\
 i_5(t) &= i_1(t) - \left( i_L(t) + i_{Rpp}(t) + \frac{dU_{cp}}{dt} \right) \tag{3}
 \end{aligned}$$

Отримана система рівнянь є нелінійною, оскільки містить в якості складових елементів нелінійні залежні джерела струмів  $I_{pt}$ ,  $I_{bit}$ ,  $I_{df}$ ,  $I_{dr}$  та ємності  $C_e$ ,  $C_c$  значення яких були взяті з [5].

Система (3) є динамічною математичною моделлю вимірювального перетворювача температури. Розв'язок цієї системи зі зворотною підстановкою у систему (2), дозволить знайти значення напруги або струму у будь-якій точці кола в будь-який момент часу.

Обрахунок системи (3) показує, що при застосуванні даної моделі на виході схеми будуть існувати періодичні коливання. На рис. 4 показані змодельовані вихідні коливання ( $t=0\dots 10$  мкс) при параметрах, наведених в [5]. Розрахунок показує, що частота коливань залежить від зміни температури середовища. З рис. 4 добре видно, що при збільшенні температури частота вихідного сигналу буде зменшуватися.

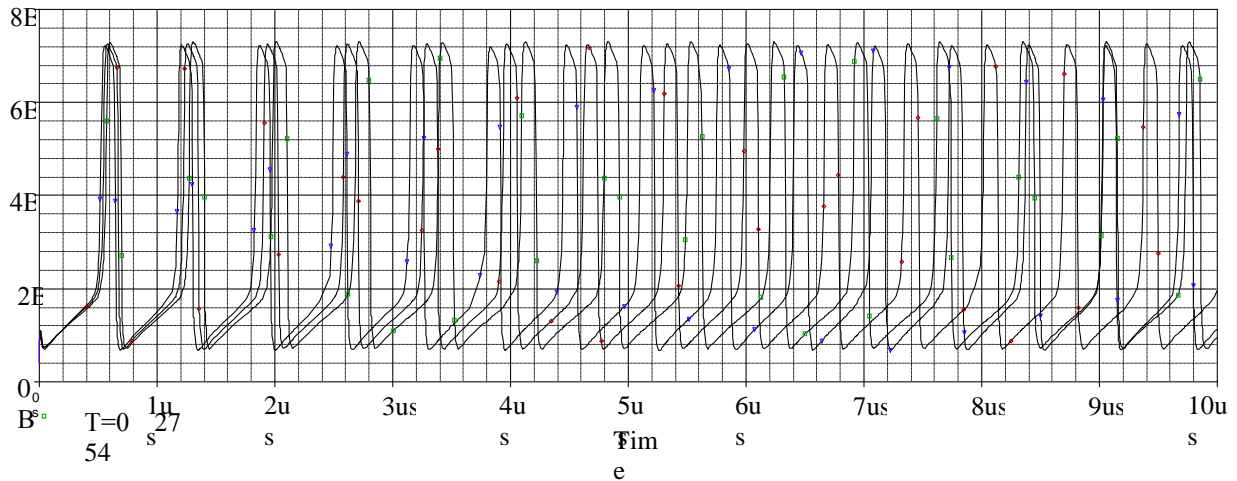


Рис. 4. Змодельовані вихідні коливання частотного перетворювача

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 статичну характеристику пристрою  $F = f(T)$ .

На рис. 5 наведено графік статичної метрологічної характеристики розробленого перетворювача, отриману методом змінних станів.

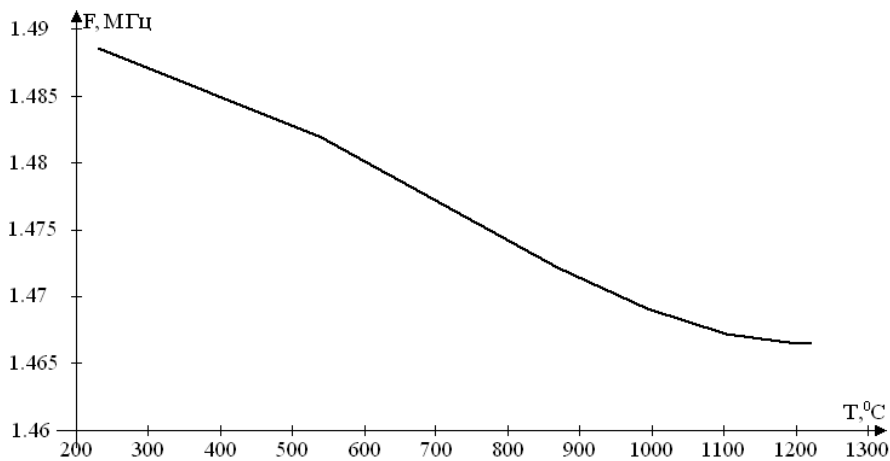


Рис. 5. Статична характеристика досліджуваного частотного перетворювача

Знайдемо аналітичний вираз функції перетворення для даного вимірювального перетворювача. Для цього скористаємось методом Ляпунова [6]. Скориставшись нелінійною еквівалентною схемою перетворювача температури на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник на рис. 3, на основі метода Ляпунова отримали:

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(C_{\text{бк}} + C_{\text{ПЕ}}(T) + C_0) - C_0 C_{\text{ПЕ}}(T) C_{\text{бк}} (R_{\text{ПЕ}}(T) + R_{\text{с}} + R_{\text{к}})}{C_{\text{ПЕ}}(T) C_0 C_{\text{бк}} L_{\text{екв}}}}. \quad (4)$$

Чутливість вимірювального перетворювача теплового контролю на основі піроелектричної структури визначається з виразу (4) як перша похідна функції перетворення по температурі:

$$S_T = \frac{1}{4\pi \left( \sqrt{\frac{2(C_{\delta k} + C_{PE}(T) + C_0) - C_0 C_{PE}(T) C_{\delta k} (R_{PE}(T) + R_{\delta} + R_k)}{C_{PE}(T) C_0 C_{\delta k} L_{екв}}} \right)} \times$$

$$\times \left( \frac{1}{C_{PE}(T) C_0 C_{\delta k} L_{екв}} \left( 2 \frac{dC_{PE}(T)}{dT} - C_0 \frac{dC_{PE}(T)}{dT} C_{\delta k} (R_{PE}(T) + R_{\delta} + R_k) - \right. \right. \quad (5)$$

$$\left. \left. - C_0 C_{PE}(T) D(C_{\delta k}) (R_{PE}(T) + R_{\delta} + R_k) \frac{dR_{PE}(T)}{dT} \right) - \right.$$

$$\left. \frac{2(C_{\delta k} + C_{PE}(T) + C_0) - C_0 C_{PE}(T) C_{\delta k} (R_{PE}(T) + R_{\delta} + R_k) \frac{dC_{PE}(T)}{dT}}{C_{PE}(T)^2 C_0 C_{\delta k} L_{екв}} \right).$$

На основі аналітичного виразу для чутливості вимірювального перетворювача теплового випромінювання можна знайти графічне відображення, що подане на рис. 6.

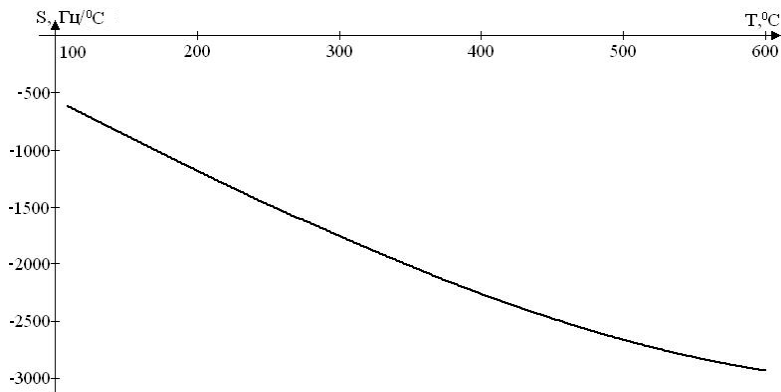


Рис. 6. Залежність чутливості сенсору теплового випромінювання на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник від температури

На рис. 7 показана теоретична вольт-амперна характеристика розробленого вимірювального перетворювача.

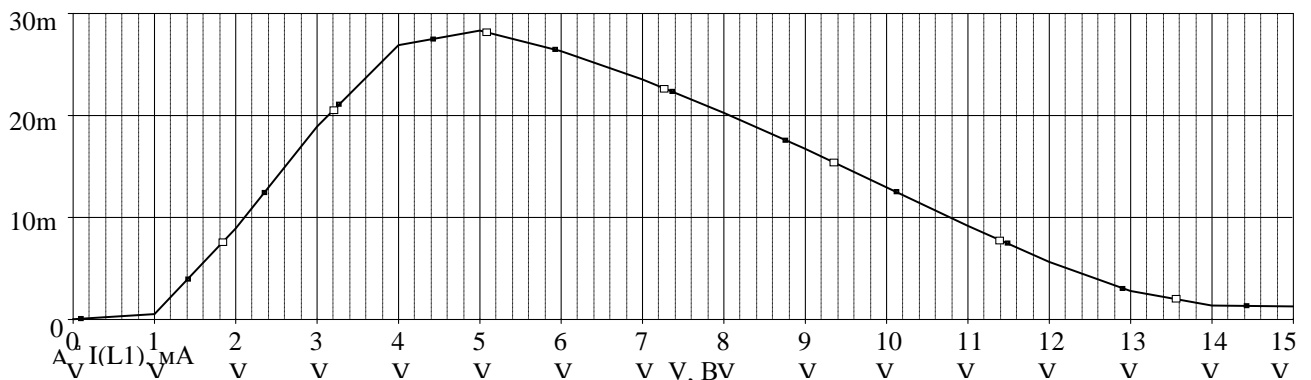


Рис. 7. Теоретична ВАХ досліджуваного перетворювача на основі піроструктури

З розробленої математичної моделі автогенераторного вимірювального перетворювача на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник видно, що зі зміною температури від 100 °C до 600 °C,

чутливість змінюється від  $500 \frac{\text{Гц}}{^\circ\text{C}}$  до  $3000 \frac{\text{Гц}}{^\circ\text{C}}$ .

### ВИСНОВКИ

1. Розроблено високочутливий сенсор теплового випромінювання на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник з чутливістю від  $500 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$  до  $3000 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$  і амплітудою вихідного сигналу 1,5 В при похибці вимірювання 0,37%.

2. Розроблено математичну модель сенсор теплового випромінювання на основі структури метал-піроелектрик-напівпровідник, яка, на відміну від існуючих, виконана в часовому домені, що надало можливість визначати зміну величини вихідного струму і напруги в часі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фесенко А.И. Методы и приборы технического диагностирования тепловой защиты и радиопоглощающих покрытий авиационно-космических аппаратов / А.И. Фесенко, И.Н. Ищук, В.В. Штейнбрехер. – М.: «Машиностроение», 2008. – 200 с. ISBN 978-5-94275-417-4

2. Осадчук В.С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / В.С. Осадчук. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с.

3. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000 – 303 с.

4. Осадчук В.С. Аналіз методів вимірювання температури на основі піроелектриків / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, С.В. Барабан, О.М. Ільченко / Матеріали 4-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Современные научные достижения – 2008» / Том 17. – Технические науки / Электротехника и радиоэлектроника / Przemysl. Nauka i studia – С. 3-11.

5. Разевиг Всеволод Данилович. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М.: Радио и связь, 1992. – 72 с.

6. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом: [Монографія] / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – 2007. – 163 с.

Надійшла до редакції 24.06.2014р.

**ОСАДЧУК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ** – д.т.н., професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, м.Вінниця, Україна.

**БАРАБАН СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ** – асистент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна.

**ЖАГЛОВСЬКА ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА** – к.т.н., асистент кафедри електроніки Вінницького національного технічного університету, м.Вінниця, Україна.

**БЕЗНОСЮК РОМАН ІГОРОВИЧ** – студент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна.