Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2001. - №1. - С.75-78

УДК 621.307

О.В. Осадчук
Вінницький державний технічний університет

ІНТЕГРАЛЬНИЙ ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Вступ

Перетворювачі температури знаходять широке застосування у різноманітних галузях народного господарства і техніки [1,2]. Інформативним параметром в більшості таких перетворювачів слугує аналоговий сигнал у формі струму або напруги [3,4], проте створення частотних перетворювачів температури, в яких інформативним параметром є частота, дає можливість значно покращити їх чутливість, швидкодію, точність вимірювання [5]. Особливо це стає актуальним, коли необхідно обробляти інформативний сигнал на основі мікропроцесорних пристроїв, або створювати "інтелектуальні" сенсори температури. Тому використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором для створення інтегральних частотних перетворювачів є актуальною задачею, вирішення якої дозволить значно покращити параметри перетворювачів температури [6,7].

Математична модель перетворювача температури з активним індуктивним елементом

Схема частотного перетворювача температури подана на рис.1. Термочутливі біполярні транзистори VT1, VT2 і VT3 реалізують генератор електричних коливань, в якому коливальний контур утворений ємнісною складовою повного опору на електродах колектор-колектор термочутливих біполярних транзисторів VT1 і VT2, та індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор термочутливого біполярного транзистора VT3. Таким чином, при дії температури на термочутливі транзистори VT1, VT2 і VT3 змінюється як ємність, так і індуктивність коливального контуру генератора, що значно підвищує чутливість і точність виміру температури, при цьому така схема перетворювача повністю реалізується у вигляді інтегральної схеми.

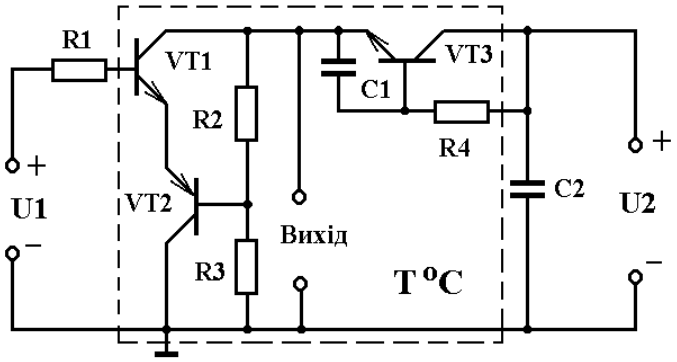

Рис.1.Схема частотного перетворювача температури

Залежність параметрів еквівалентної схеми біполярних транзисторів VT1 і VT2, які утворюють ємність коливального контуру від дії температури, розглянуто у роботах [6,7]. В даній роботі розглянута залежність активної індуктивності і добротності від зміни температури. Значення індуктивності на основі біполярного транзистора з RC- колом розраховані у роботі [8], яка має вигляд

$$L = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{A_4 A_1 - A_3 A_2}{A_1^2 + A_2^2}\ , \qquad (1)$$

де $A_1 = \omega C\left[r_б^2 - 2 r_б R\alpha_1 + R^2\alpha_1^2 - R^2\alpha_2^2 + \frac{1}{(\omega C)^2} \right],$

$A_2 = 2\omega C\left[R\alpha_2 (r_б - R\alpha_1) \right],$

$A_3 = \left[r_б R\alpha_1 - R^2\alpha_1 + R^2\alpha_2^2 + r_б \frac{R^2}{r_K} - 2\frac{R^3}{r_K}\alpha_1 + \frac{1}{(\omega C)^2} \right],$

$A_4 = \left[2R^2\alpha_1\alpha_2 - r_б R\alpha_2 + \frac{2R^3}{r_K}\alpha_2 \right],$

$\alpha_1 = \dfrac{\alpha_0}{1+(f/f_\alpha)^2}$ - дійсна складова коефіцієнта передачі струму у схемі із загальною базою, $\alpha_2 = \dfrac{\alpha_0 f/f_\alpha}{1+(f/f_\alpha)^2}$ - уявна складова коефіцієнта передачі струму у схемі із загальною базою, f_α - гранична частота біполярного транзистора у схемі із загальною базою, f - робоча частота.

Добротність індуктивності визначається формулою

$$Q = \frac{(A_4A_1 - A_3A_2)\omega C}{\omega C(A_3A_1 + A_4A_2) - A_1^2 - A_2^2} \quad . \tag{2}$$

Формули (1) і (2) отримані при умові $r_K >> R$, $R >> r_б$, $r_б >> r_e$. Вплив температури на індуктивність і добротність визначається через залежність $r_б, \alpha_1, \alpha_2, r_K$, як показує аналіз (1) і (2). Залежність опору *R* і ємності *C*, які утворюють коло зворотного зв'язку у біполярному транзисторі VT3, також треба враховувати.

Розглянемо залежність вищезгаданих параметрів від температури. Залежність α_1 і α_2 від температури визначається через температурну залежність складових, які входять в їх аналітичний вираз

$$\alpha_{1,2} = \frac{1 - \dfrac{W_0^2}{L_{рб}^2}}{1 + \dfrac{\rho_e W_0}{\rho_б L_{ne}}} \quad , \tag{3}$$

де W_0 - ширина бази, $\rho_e, \rho_б$ - питомий опір області емітера і бази, $L_{рб}, L_{ne}$ - дифузійна довжина дірок в області бази і електронів у області емітера. Якщо прийняти, що W_0 не залежить від температури, $L_{рб}$ і L_{ne} незначно змінюються від температури, ρ_e практично не залежить від температури, а $\rho_б$ значно збільшується зі зростанням температури. Просумувавши усі ці фактори, можна сказати, що при збільшенні температури величини $\alpha_{1,2}$ будуть зростати, що підтверджуються експериментальними дослідженнями [9,10]. Залежність опору *R* і внутрішнього активного опору бази $r_б$ від температури виражається в такий спосіб: питомий опір базового матеріалу зростає з температурою [9,10], а внутрішній активний опір бази відповідно до $r_б = \rho_б / W_0$ спрощеної формули знаходиться у прямій залежності від питомого опору базового матеріалу, отже, він також буде зростати.

Залежність граничної частоти в схемі із загальною базою виражаються формулою

$$f_x = \frac{1,22kT\mu_n}{\pi q W_{еф}^2} \quad , \tag{4}$$

де *k* – стала Больцмана, *T* – температура, μ_n - рухливість електронів, $W_{еф}$ - ефективна товщина бази, *q* – заряд електрона. З формули (4) видно, що f_α - пропорційна температурі *T* і рухливості носіїв заряду, яка убуває із зростанням температури за законом $T^{-3/2}$. Таким чином, загальний ефект буде такий, що f_α буде зменшуватись зі зростанням температури. Ємність *C* кола зворотного зв'язку біполярного транзистора VT3 вважаємо, що не залежить від температури, тому що вона виготовлена на основі SiO_2 [11]. Залежність опору колектора від температури описується виразом

$$R_K = R_{K2}\left[1 + T_{RK1}(T - T_0) + T_{RK2}(T - T_0)^2\right] , \tag{5}$$

де T_{RK1} - лінійний температурний коефіцієнт, T_{RK2} - квадратичний температурний коефіцієнт, T_0 - температура корпусу транзистора, *T* – температура навколишнього середовища.

Таким чином, визначивши залежність всіх складових від температури, що входять у формули (1) і (2), можна отримати залежність індуктивності і добротності від температури. Слід зауважити, що формули (1) - (4) не зовсім точно описують залежність активної індуктивності і добротності від температури, тому що необхідно врахувати залежність ємнісної складової від температури, а також врахувати вплив активних складових повних опорів, які входять як в ємнісну, так і в індуктивну складові повних опорів на еле-

ктродах колектор-колектор VT1 і VT2, та на електродах емітер-колектор VT3. Тому виникає необхідність розрахувати повні опори і на їх основі отримати функцію перетворення і чутливості.

Еквівалентна схема перетворювача, яка містить елементи, що залежать від дії температури подана на рис.2. Для зручності розрахунків перетворимо її у більш компактну (рис.3). Система рівнянь Кірхгофа, згідно рис.3, має вигляд

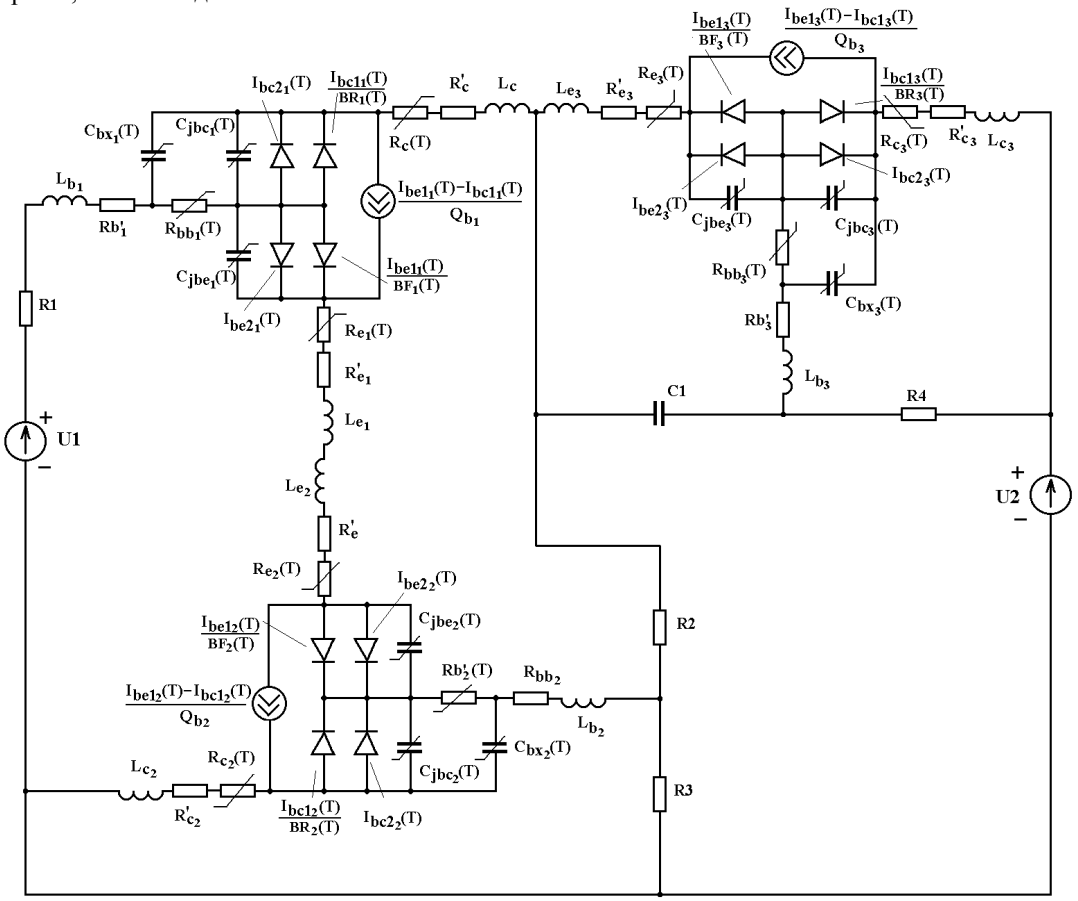

Рис.2.Еквівалентна схема перетворювача температури

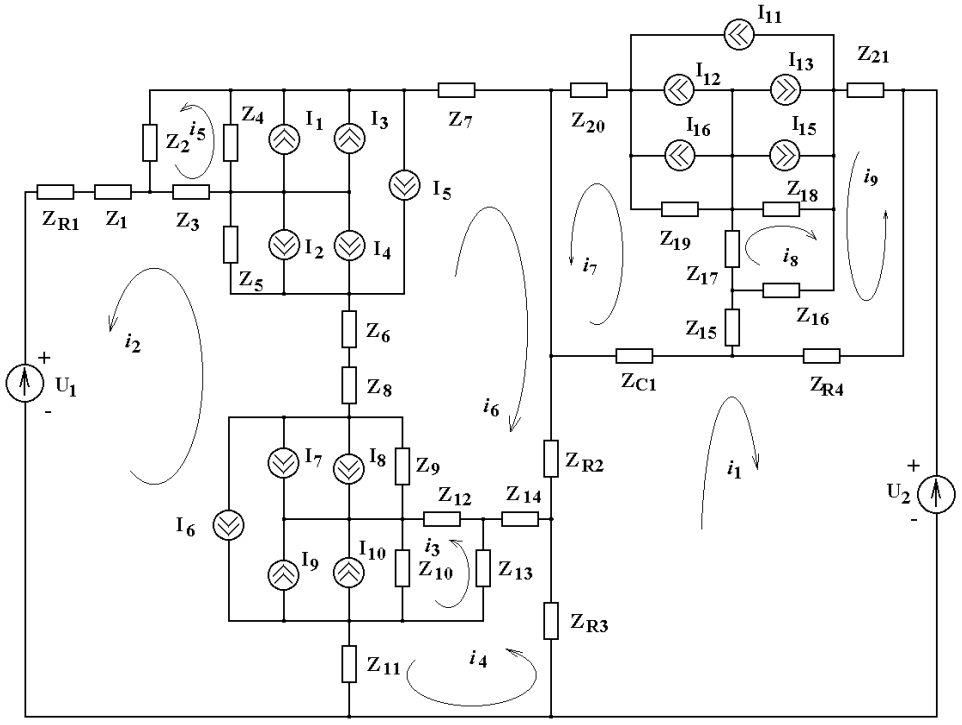

Рис.3. Перетворена еквівалентна схема

$$
\begin{aligned}
&U_2 = (Z_{R3} + Z_{R2} + Z_{C1} + Z_{R4})i_1 + Z_{R3}i_4 - Z_{R2}i_6 + Z_{C1}i_7 + Z_{R4}i_9,\\
&U_1 = (Z_{R1} + Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11})i_2 - Z_3 i_5 - Z_3 I_1 - Z_3 I_3 + Z_3 I_5 + Z_5 I_2 + Z_5 I_4 +\\
&+Z_5 I_5 + Z_5 i_6 + Z_6 i_6 + Z_8 i_6 + Z_9 i_6 + Z_9 I_8 + Z_9 I_7 + Z_9 I_6 - Z_{10} i_3 - Z_{10} I_{10} - Z_{10} I_9 + Z_{10} I_6 - Z_{11} i_4,\\
&0 = (Z_{10} + Z_{13} + Z_{12})i_3 - Z_{10} i_2 + Z_{10} I_{10} + Z_{10} I_9 - Z_{10} I_6 - Z_{13} i_4 - Z_{13} I_{10} - Z_{13} I_9 + Z_{13} I_6 +\\
&+Z_{12} i_6 - Z_{12} I_{10} - Z_{12} I_9 + Z_{12} I_6,\\
&0 = (Z_{R3} + Z_{14} + Z_{13} + Z_{11})i_4 + Z_{R3} i_1 + Z_{14} i_6 - Z_{13} i_3 + Z_{13} I_9 + Z_{13} I_{10} - Z_{13} I_6 - Z_{11} i_2,\\
&0 = (Z_3 + Z_4 + Z_2)i_5 - Z_3 i_2 + Z_3 I_1 + Z_3 I_3 - Z_3 I_5 + Z_4 i_6 - Z_4 I_1 - Z_4 I_3 + Z_4 I_5 + Z_2 I_1 + Z_2 I_3 - Z_2 I_5,\\
&0 = (Z_{R2} + Z_{14} + Z_{12} + Z_9 + Z_8 + Z_6 + Z_5 + Z_4 + Z_7)i_6 - Z_{R2} i_1 + Z_{14} i_4 + Z_{12} i_3 - Z_{12} I_9 - Z_{12} I_{10} + Z_{12} I_6 +\\
&+Z_9 i_2 + Z_9 I_8 + Z_9 I_7 + Z_9 I_6 + Z_8 i_2 + Z_6 i_2 + Z_5 i_2 + Z_5 I_4 + Z_5 I_2 + Z_5 I_5 + Z_4 i_5 - Z_4 I_1 - Z_4 I_3 + Z_4 I_5,\\
&0 = (Z_{C1} + Z_{15} + Z_{17} + Z_{19} + Z_{20})i_7 + Z_{C1} i_1 - Z_{15} i_9 + Z_{17} i_8 - Z_{17} I_{11} + Z_7 I_{13} + Z_{17} I_{15} -\\
&-Z_{19} I_{14} - Z_9 I_{12} - Z_{19} I_{11},\\
&0 = (Z_{18} + Z_{17} + Z_{16})i_8 - Z_{18} I_{13} - Z_{18} I_{15} + Z_{18} I_{11} + Z_{17} i_7 + Z_{17} I_{15} + Z_{17} I_{13} - Z_{17} I_{11} +\\
&+Z_{16} i_9 + Z_{16} I_{15} + Z_{16} I_{13} - Z_{16} I_{11},\\
&0 = (Z_{21} + Z_{16} + Z_{15} + Z_{R4})i_9 + Z_{16} i_8 + Z_{16} I_{15} + Z_{16} I_{13} - Z_{16} I_{11} - Z_{15} i_7 + Z_{R4} i_1,
\end{aligned}
\tag{6}
$$

де

$I_1 = I_{bc2}(T)$; $I_2 = I_{be2}(T)$; $I_3 = I_{bc1}(T)/\beta_R(T)$;

$I_4 = I_{be1}(T)/\beta_F(T)$; $I_5 = (I_{be1}(T) - I_{bc1}(T))/Q$; $I_1 = I_{10} = I_{15}$; $I_2 = I_8 = I_{14}$;

$I_3 = I_9 = I_{13}$; $I_4 = I_7 = I_{12}$; $I_5 = I_6 = I_{11}$; $Z_L = j\omega L$;

$Z_{R1} = R_1$; $Z_{R2} = R_2$; $Z_{R3} = R_3$;

$Z_1 = R_b^{'} + j\omega L_b$; $Z_2 = -j/\omega C_{bx}(T)$; $Z_3 = R_{bb}(T)$;

$Z_4 = -j/\omega C_{jbc}(T)$; $Z_5 = -j/\omega C_{jbe}(T)$; $Z_6 = R_e^{'} + R_e(T) + j\omega L_e$;

$Z_7 = R_c^{'} + R_c(T) + j\omega L_c$; $Z_1 = Z_{14} = Z_{15}$; $Z_2 = Z_{13} = Z_{16}$;

$Z_3 = Z_{12} = Z_{17}$; $Z_4 = Z_{10} = Z_{18}$; $Z_5 = Z_9 = Z_{19}$;

$Z_6 = Z_8 = Z_{20}$; $Z_7 = Z_{11} = Z_{21}$.

Значення параметрів елементів еквівалентної схеми (рис.3) для теоретичних розрахунків отримано з робіт [12,13]. Розв'язок системи рівнянь (6) проведено чисельним методом на персональному комп'ютері типу "Pentium". Вплив температури на еквівалентні ємність та індуктивність коливального контуру передається через зміну параметрів елементів еквівалентної схеми, тому функція перетворення описується рівнянням

$$\omega_0 = \left[L_{екв}(T) \cdot C_{екв}(T)\right]^{-1/2}, \tag{7}$$

де ω_0 - кругова частота генерації, $L_{екв}(T)$ - еквівалентна індуктивність коливального контуру, $C_{екв}(T)$ - еквівалентна ємність коливального контуру генератора, які визначаються на основі розв'язку системи рівнянь (6). Чутливість частотного перетворювача температури визначається на основі (7)

$$\frac{d\omega_0}{dT} = -\frac{1}{2}\left[L_{екв}(T) \cdot C_{екв}(T)\right]^{-3/2}\left(C_{екв}(T)\frac{dL_{екв}(T)}{dT} + L_{екв}(T)\frac{dC_{екв}(T)}{dT}\right). \tag{8}$$

Теоретична і експериментальна залежності частоти генерації від температури подані на рис.4. Чутливість частотного перетворювача складає 2,25 кГц/^{0}С.

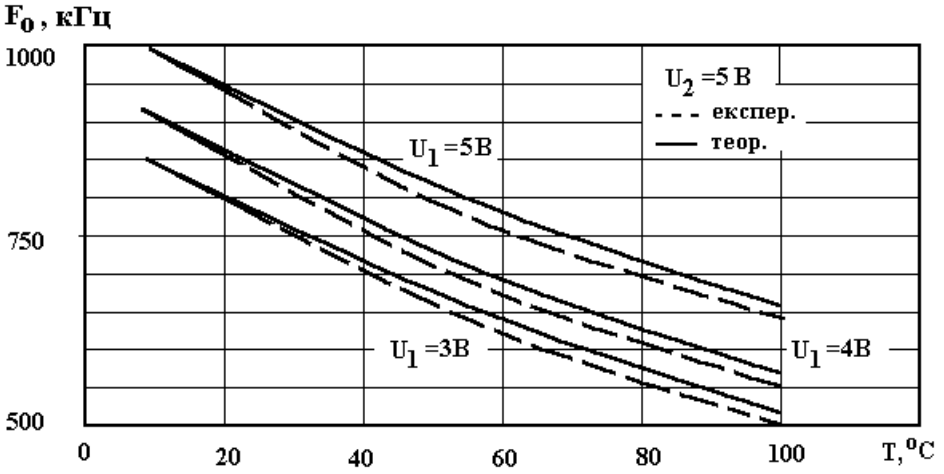

Рис.4.Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації від температури

Експериментальні дослідження проводились за стандартною методикою [14], причому в якості термочутливих елементів використовувались безкорпусні транзистори типу КТ363БМ, КТ368, КТ209. Температура вимірювались за допомогою ртутних термометрів.

Висновки

Розроблена математична модель частотного перетворювача температури на основі термочутливих біполярних транзисторів, яка дозволила отримати функцію перетворення і чутливості. Термочутливі транзистори реалізують ємність і індуктивність коливального контуру генератора, які змінюються під дією температури, що дозволило підвищити чутливість перетворювача.

Література

1. Schaumburg H. Sensoren. T.3. B.G. Teubner Stuttgart, 1992. –583 P.
2. Луцик Я., Буняк Л., Стадник Б. Застосування ультразвукових сенсорів. –Львів:СП “БаК”,1998.–232 с.
3. Аш Ж. Датчики измерительных систем. В 2-х книгах. –М.: Мир, 1992. –424с.
4. Виглеб Т. Датчики. –М.: Мир, 1989. –196 с.
5. Новицкий П.В., Кноринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. –Л.: Энергия, 1970. – 423 с.
6. Осадчук В.С., Осадчук А.В. Математическая модель частотного преобразователя температуры // Elektronika ir Elektrotechnika. 2000. №3(26). -P.33-38.
7. Осадчук О.В. Математична модель частотного перетворювача температури на основі біполярної транзисторної структури з від’ємним опором // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 1999. №4. –С.49-53.
8. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: “Універсум-Вінниця”, 1999. –275 с.
9. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов. –М.: Сов. Радио, 1970. –590 с.
10. Спиридонов Н.С. Основы теории транзисторов. –К.: Техника, 1969. –299 с.
11. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. –М.: Радио и связь, 1992. –320 с.
12. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 выпусках. Вып.3: Моделирование аналоговых устройств. –М.:Радио и связь, 1992.–120 с.
13. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. –М.: Радио и связь, 1991. –528 с.
14. Электрические измерения. Под редакцией Е.Г. Шрамкова. –М.: Высшая школа, 1972. –518 с.