

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ З РЕЗОНАНСНИМ КОНТУРОМ НА ОСНОВІ ДВОЗАТВОРНОЇ МДН-СТРУКТУРИ

У роботі показано можливість прямого перетворення температури в частоту на основі гібридної інтегральної схеми, в якій термочутливий резонансний контур побудований на основі двозатворного МДН-транзистора. Отримано аналітичні залежності функції перетворення і проведені її експериментальні дослідження. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що чутливість перетворювача лежить у діапазоні від 12 кГц/К до 32 кГц/К.

Вступ

Вимірювання температури відіграє значну роль у визначенні складу речовини, вивченні дальнього і ближнього космосу, контролі різноманітних технологічних процесів, методів діагностики в техніці та медицині, моніторингу навколишнього середовища [1, 2].

Більшість перетворювачів температури є аналоговими, у яких температура перетворюється в електричний сигнал у вигляді напруги або струму [3, 4]. Використання перетворювачів з частотним вихідним сигналом дозволяє отримати ряд переваг у порівнянні з аналоговими, які містяться у значному підвищенні завадостійкості, що дозволяє підвищити точність вимірювання, а також у можливості отримання значних вихідних сигналів. Це дозволяє відмовитись від підсилювальних пристроїв та аналого-цифрових перетворювачів в наступній обробці сигналів, що підвищує ефективність вимірювальної апаратури [5, 6]. В роботі запропоновано новий підхід для створення перетворювача температури з частотним виходом на основі двозатворного МДН-транзистора, повний опір якого залежить від дії температури.

Теоретичні і експериментальні дослідження

Принцип дії автогенераторного перетворювача температури на основі відомої схеми високостабільного двоточкового генератора гармонійних коливань з паралельним LC-контуром (рис.1,а), який може бути використаний як чутливий елемент вимірювального приладу, ґрунтується на індуктивному ефекті. У схемі такого генератора реактивні компоненти коливного контуру реалізовані з використанням двозатворного МДН-транзистора (рис.1, б).

Реактивний двозатворний МДН-транзистор має індуктивний характер повного опору в представленій схемі ввімкнення і разом з еквівалентною ємністю утворює вимірювальний коливний контур, тобто індуктивність контуру – еквівалентна індуктивність ділянки "Витік-Стік", а ємність, відповідно, – це міжелектродна ємність "Затвор1-Затвор2".

Зміна власної частоти LC-контуру функціонально пов'язана зі зміною температури в контрольованому середовищі. Чутливим до температури елементом вимірювального контуру служить еквівалентна індуктивність. З підвищенням температури індуктивність "С-В" МДН-транзистора зростає, що призводить до зменшення резонансної частоти на виході автогенераторного вимірювального перетворювача. Отже, математична модель такого перетворювача може бути представлена:

$$T \rightarrow L_{\text{екв}} \rightarrow f. \quad (1)$$

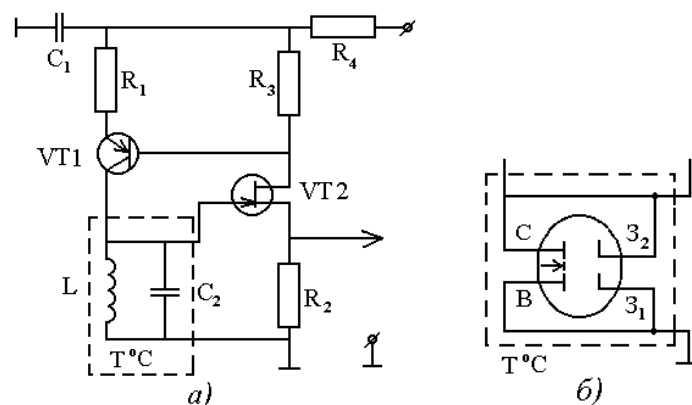


Рис.1. Перетворювач температури з паралельним LC-контуром:
а) – електрична принципова схема; б) – еквівалентний коливний контур

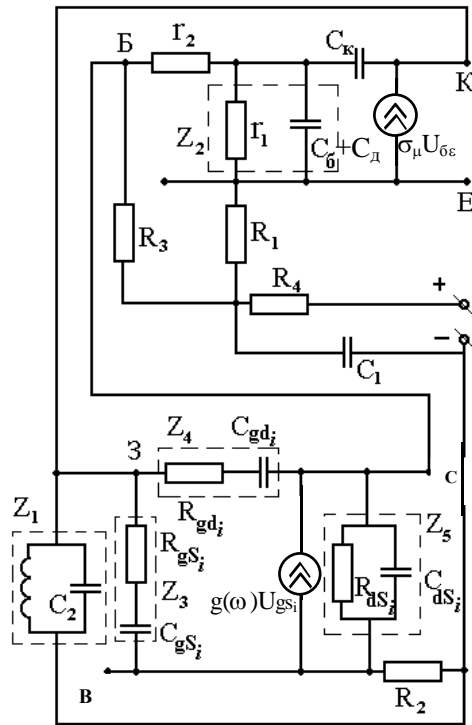


Рис.2. Еквівалентна схема перетворювача температури

Умова збудження автогенераторного вимірювального перетворювача відповідно до методу Ляпунова знаходиться за лінійною еквівалентною схемою. Кількісно коло зворотного зв'язку оцінюється комплексними функціями – зворотною різницею \underline{F} і зворотним відношенням \underline{T} , які зв'язані між собою [7]:

$$\underline{T} = 1 - \underline{F} \quad (2)$$

де

$$\underline{F} = \underline{\Delta} / \underline{\Delta}^0 \quad (3)$$

$\underline{\Delta}$ – визначається за рівняннями контурних струмів, отриманими за еквівалентною схемою автогенераторного вимірювального перетворювача, $\underline{\Delta}^0$ – визначається за рівняннями контурних струмів за еквівалентною схемою автогенераторного вимірювального перетворювача при розірваному колі зворотного зв'язку.

Для визначення комплексних функцій \underline{F} (2) та \underline{T} (3) спростимо отриману схему до вигляду (рис.3), зручного для проведення розрахунків за методом контурних струмів.

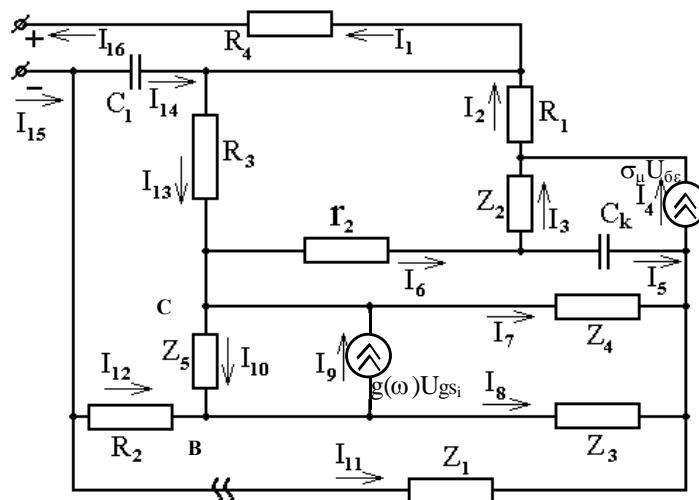


Рис.3. Спрощена еквівалентна схема перетворювача температури

Запишемо систему лінійних рівнянь, що відповідають цій схемі через ділянкові струми. Вона матиме вигляд:

$$\begin{cases} R_4 I_1 + X_1 I_{14} = U; \\ r I_4 + X_k I_5 - Z_2 I_3 = 0; \\ Z_2 I_3 + R_1 I_2 + r_2 I_6 - R_3 I_{13} = 0; \\ Z_1 I_{14} + R_3 I_{13} + Z_5 I_{10} - R_2 I_{12} = 0; \\ Z_4 I_7 - X_k I_5 - r_2 I_6 = 0; \\ Z_5 I_{10} + r I_9 = 0; \\ Z_3 I_8 - Z_4 I_7 - r I_9 = 0; \\ Z_1 I_{11} - Z_3 I_8 - R_2 I_{12} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де $X_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$; $X_k = \frac{1}{j\omega C_k}$; $r_\mu = \frac{1}{\delta_\mu}$; $r_\omega = \frac{1}{g(\omega)}$.

Виразимо ділянкові струми через контурні і перетворивши систему рівнянь (4), отримаємо таку систему:

$$\begin{cases} (R_4 + X_1) I_{k1} + X_1 I_{k4} = U; \\ (r + X_k + Z_2) I_{k2} - Z_2 I_{k3} - X_k I_{k5} = 0; \\ - Z_2 I_{k2} + (Z_2 + R_1 + r_2 - R_3) I_{k3} - R_3 I_{k4} - r_2 I_{k5} = 0; \\ X_1 I_{k1} + R_3 I_{k3} + (X_1 + R_3 + Z_5 + R_2) I_{k4} + Z_5 I_{k6} + R_3 I_{k8} = 0; \\ - X_k I_{k2} - r_2 I_{k3} + (Z_4 + X_k + r_2) I_{k5} - Z_4 I_{k7} = 0; \\ Z_5 I_{k4} + (Z_5 + r) I_{k6} - r I_{k7} = 0; \\ - Z_4 I_{k5} - r I_{k6} + (Z_3 + Z_4 + r) I_{k7} - Z_3 I_{k8} = 0; \\ R_2 I_{k4} - Z_3 I_{k7} + (Z_1 + R_2 + Z_3) I_{k8} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Отриманій системі рівнянь може бути поставлена у відповідність матриця А, головний визначник якої Δ_a матиме вигляд:

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} \dot{a}_{11} & 0 & 0 & a_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{a}_{22} & \dot{a}_{23} & 0 & \dot{a}_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{a}_{32} & \dot{a}_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & \dot{a}_{44} & 0 & \dot{a}_{46} & 0 & a_{47} \\ 0 & \dot{a}_{52} & a_{53} & 0 & \dot{a}_{55} & 0 & a_{57} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{a}_{64} & 0 & \dot{a}_{66} & \dot{a}_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{75} & \dot{a}_{76} & \dot{a}_{77} & \dot{a}_{78} \\ 0 & 0 & 0 & a_{84} & 0 & 0 & \dot{a}_{87} & \dot{a}_{88} \end{vmatrix} = \dot{a}_{11} \cdot \dot{a}_{22} \cdot \dot{a}_{33} \cdot \dot{a}_{44} \cdot \dot{a}_{55} \cdot \dot{a}_{66} \cdot \dot{a}_{77} \cdot \dot{a}_{88}, \quad (6)$$

де a_{ij} – не рівні нулю елементи зазначеної матриці.

Якщо для схеми перетворювача (рис.3), розірвати коло зворотного зв'язку у зазначеному місці, то отримаємо систему рівнянь, якій відповідатиме матриця В, головний визначник якої Δ_b запишеться у вигляді:

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} b_{11} & 0 & 0 & b_{14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & b_{23} & 0 & b_{25} & 0 & 0 \\ 0 & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & 0 & 0 \\ b_{41} & 0 & b_{42} & b_{44} & 0 & b_{46} & 0 \\ 0 & b_{52} & b_{53} & 0 & b_{55} & 0 & b_{57} \\ 0 & 0 & 0 & b_{64} & 0 & b_{66} & b_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{75} & b_{76} & b_{77} \end{vmatrix} = b_{11} \cdot b_{22} \cdot b_{33} \cdot b_{44} \cdot b_{55} \cdot b_{66} \cdot b_{77}, \quad (7)$$

де b_{mn} – не рівні нулю елементи зазначеної матриці.

Неважко переконатись, що $a_{11} = b_{11}$, $a_{22} = b_{22}$, $a_{33} = b_{33}$, $a_{44} = b_{44}$, $a_{55} = b_{55}$, $a_{66} = b_{66}$, $a_{77} = b_{77}$.

Таким чином зворотна різниця згідно (3) з урахуванням (5), (6), (7) може бути представлена:

$$\underline{F} = \frac{\Delta}{\Delta^o} = \frac{\Delta_a}{\Delta_b} = a_{88} = Z_1 + R_2 + Z_3 . \quad (8)$$

Зворотне відношення відповідно до (2) з урахуванням (8) матиме вигляд:

$$\underline{T} = 1 - \underline{F} = 1 - Z_1 - R_2 - Z_3 . \quad (9)$$

Представимо Z_1 , Z_3 згідно еквівалентної схеми (рис.2):

$$Z_1 = \frac{j\omega L_x}{1 - \omega^2 C_2 L_x} ,$$

$$Z_3 = R_{gd_i} + \frac{1}{j\omega C_{gs_i}} . \quad (10)$$

Прийнявши до уваги (10), перепишемо (9):

$$\underline{T} = 1 - \frac{j\omega L_x}{1 - \omega^2 C_2 L_x} - R_2 - R_{gd_i} - \frac{1}{j\omega C_{gs_i}} . \quad (11)$$

Як уже було зазначено вище, умова балансу фаз автогенератора буде виконуватись на частоті, на якій уявна складова функції T рівна нулю. Виділивши у (11) уявну складову та прирівнявши її до нуля, визначимо значення частоти коливань досліджуваного автогенераторного вимірювального перетворювача:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_x (C_{gs_i} + C_2)}} , \quad (12)$$

де C_{gs_i} – ємність між затвором та витком польового транзистора ($2 \cdot 10^{-12}$ Ф); C_2 – міжзатворна ємність двозатворного транзистора КП327А еквівалентного коливного контуру ($2,4 \cdot 10^{-12}$ Ф); L_x – еквівалентна індуктивність коливного контуру. Враховуючи особливості ввімкнення двозатворного транзистора у приведеній схемі автогенераторного вимірювального перетворювача, скористаємося моделлю індуктивності для випадку $U_3 < 0$. В результаті отримаємо:

$$\omega = \left[\frac{(ablkT)^2 - 2ablkTqD_n\rho_oCU_3 + (qD_n\rho_oCU_3)^2}{\rho_o l^2 qD_n CU_3 k \tau_n (C_{gs_i} + C_2) - (q\rho_o D_n CU_3 \tau_n)^2} \right]^{1/2}$$

або

$$f = \frac{\alpha^2 T^2 - 2\alpha\beta T + \beta^2}{2\pi(\beta\gamma T - (\beta\tau_n)^2)} , \quad (13)$$

де $\alpha = ablk = 0,28 \cdot 10^{-41} \text{ м}^5 \text{ кг}/(\text{К} \cdot \text{с}^2)$; $\beta = qD_n\rho_oCU_3 = 9,63 \cdot 10^{-39} \text{ А м}^3 \text{ с}$ (при $U_3 = 1\text{В}$); $\gamma = \rho_o l^2 \tau_n (C_{gs_i} + C_2)k = 8,74 \cdot 10^{-57} \text{ м}^5 \text{ кг}/\text{К}$.

Порівняння результатів розрахунку з експериментом виявило збіг у межах $\pm 5\%$ (рис.4).

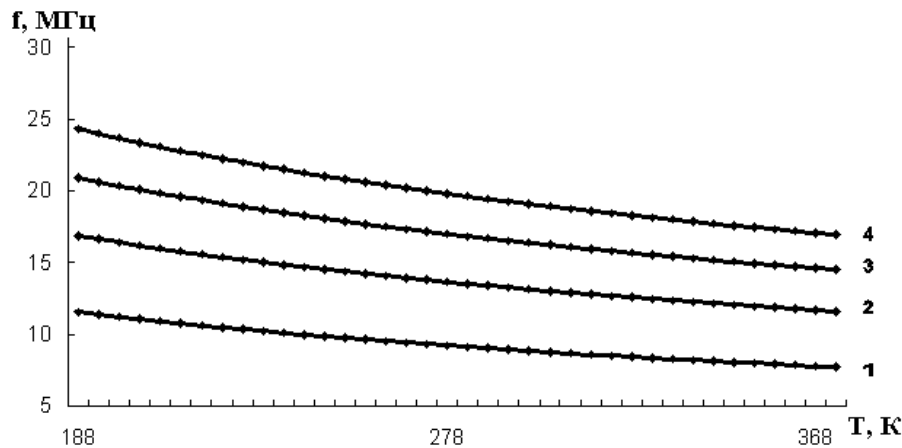


Рис.4. Залежності вихідної частоти автогенераторного вимірювального перетворювача для різних значень напруг зміщення на затворі: 1– $U_3=1\text{В}$; 2– $U_3=2\text{В}$; 3– $U_3=3\text{В}$; 4– $U_3=4\text{В}$

Як видно з графіків, існує певне значення напруги зміщення на затворі ($U_3=1\text{В}$), при якій відповідна залежність носить лінійний характер. При цій нарузі температурна залежність чутливості $\frac{\partial f}{\partial T}$ перетворювача матиме вигляд (рис.5).

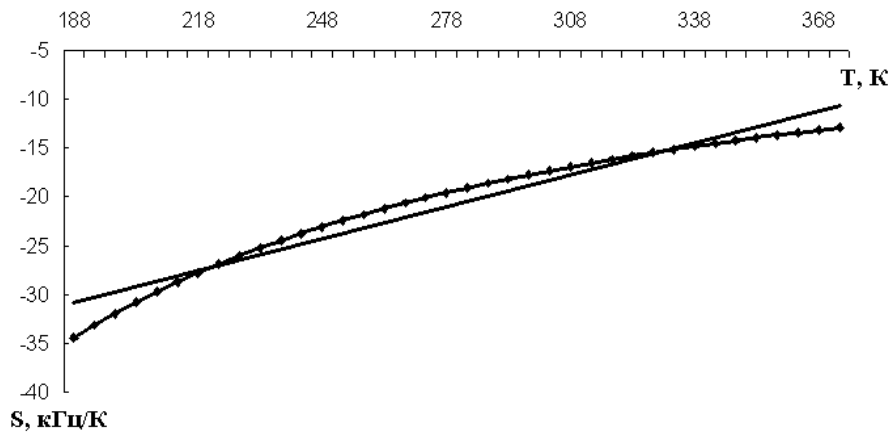


Рис.5. Теоретична (----) та експериментальна (---•---) температурна залежності чутливості автогенераторного вимірювального перетворювача

Висновки

Показана можливість прямого перетворення температури в частоту на основі гібридної інтегральної схеми, в якій термочутливий коливальний контур побудований на основі двозатворного МДН-транзистора. Отримано аналітичну залежності функції перетворення і проведені експериментальні дослідження. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що чутливість перетворювача лежить у діапазоні від 12 кГц/К до 32 кГц/К.

Література

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. За редакцією З.Ю.Готри. В 3 томах. – Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.2. – 595 с.
2. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-електронные системы измерения температуры. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
3. Новицкий П.В., Кноринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. –Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. –М.: Радио и связь, 1990. –264 с.
5. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. – 303 с.
6. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Вербицький В.Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 195 с.
7. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники. –М.: Высшая школа, 1988. – 464с.