

## РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

УДК 621.383

В. С. ОСАДЧУК, О. В. ОСАДЧУК, В. В. МАРТИНЮК, О. П. БІЛИЛІВСЬКА

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

## МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ З МАГНІТОЧУТЛИВИМ ЕЛЕМЕНТОМ ХОЛЛА

**Анотація.** Запропонована мікроелектронна схема перетворювача магнітної індукції у частотний сигнал з магніточутливим елементом Холла. На основі математичної моделі, що складається з рівнянь Кірхгофа, які описують поведінку схеми, отримані функція перетворення та рівняння чутливості. Чутливість перетворювача складає 2-18 кГц/мТл в діапазоні зміни магнітної індукції від 0,01 мТл до 300 мТл.

**Ключові слова:** магнітне поле, частотний вихід, елемент Холла, математична модель, чутливість.

**Аннотация.** Предложена микроэлектронная схема преобразователя магнитной индукции в частотный сигнал с магниточувствительным элементом Холла. На основе математической модели, базирующейся на уравнениях Кирхгофа, которые описывают поведение схемы, получены функция преобразования и уравнение чувствительности. Чувствительность преобразователя составляет 2-18 кГц/мТл в диапазоне изменения магнитной индукции от 0,01 мТл до 300 мТл.

**Ключевые слова:** магнитное поле, частотный выход, элемент Холла, математическая модель, чувствительность

**Abstract.** The microelectronic circuit of the transducer of magnetic induction into frequency signal with magnetosensitive Hall element is proposed. On the basis of the mathematical model basing equations Kirgoff which present behavior of the circuit, function of transformation and the equation of sensitivity are received. The sensitivity has 2-18 kHz/mT in range of magnetic induction from 0,01 mT up to 300 mT.

**Key words:** magnetic field, frequency output, Hall element, mathematical model, sensitivity.

## Вступ

На сьогодні магнітні сенсори широко використовуються як для безпосереднього вимірювання магнітних величин, так і в якості проміжних перетворювачів для реєстрації частоти обертання, положення, відстані, кутових та лінійних переміщень, вимірювання струму, виявлення дефектів у магнітних матеріалах та виробів тощо. Разом з тим, вимоги до чутливості, роздільної здатності та інших важливих параметрів вимірювальних систем постійно зростають. Тому виникає потреба у розробці нових перетворювачів магнітного поля, які б відповідали цим вимогам.

## Актуальність

Елементи Холла є найпоширенішими перетворювачами магнітного поля в електричний сигнал. Інтегральні сенсори Холла виробляють такі фірми, як Honeywell, Melexis, Allegro Microsystems, Micronas Intermetall, Siemens, Analog Devices та інші. Як правило, необхідна попередня обробка сигналу з таких вимірювачів полягає в підсиленні, температурній компенсації тощо [1-3]. Оскільки сучасні сенсори магнітного поля на основі ефекту Холла є переважно аналоговими пристроями, їх недоліками є низький рівень вихідного сигналу (десяті долі – одиниці мілівольта), низька завадостійкість (і відповідно, низька точність), необхідність аналогово-цифрового перетворення та підсилювальної апаратури.

Використання транзисторних структур з від'ємним опором для побудови мікроелектронних перетворювачів магнітного поля з частотним виходом виключає використання аналого-цифрових перетворювачів при обробці сигналів, що знижує собівартість систем контролю і управління. Крім того, частотні магнітні перетворювачі поєднують простоту і універсальність, які властиві аналоговим пристроям, із точністю та завадостійкістю, що характерні для перетворювачів з кодовим виходом, мають високу чутливість, малу масу, габарити, конструктивну та технологічну сумісність з мікроелектронними засобами обробки інформації. Що і є перевагою їх перед існуючими сенсорами магнітної індукції [4, 5].

## Мета

Метою дослідження є розгляд можливості побудови мікроелектронного перетворювача магнітної індукції у частотний сигнал на основі нового підходу – використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

## Задачі

1. Розробити математичну модель магнітного перетворювача.
2. Отримати аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості.
3. Розробити схему перетворювача магнітної індукції у частоту.
4. Здійснити технічну реалізацію і провести експериментальні дослідження.
5. Порівняти теоретичні і експериментальні залежності основних параметрів перетворювачів.

## Математична модель

З метою вивчення властивостей частотного перетворювача магнітної індукції на основі біполярних транзисторів необхідно розробити математичну модель, яка дозволила б отримати аналітичні залежності активної і реактивної складової повного опору на електродах колектор-колектор структури, функцій

перетворення і чутливості від дії магнітної індукції. Електрична схема перетворювача приведена на рис. 1. Це гібридна інтегральна схема, що складається з трьох біполярних транзисторів, які є основою автогенераторного пристрою, у ланцюг зворотного позитивного зв'язку якого включений сенсор Холла.

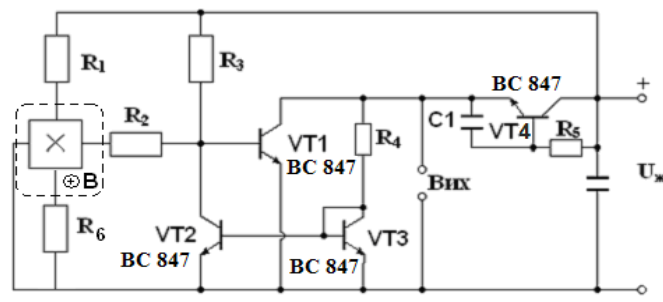


Рисунок 1 – Електрична схема частотного перетворювача магнітної індукції

На електродах колектор-емітер транзисторів VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер. Підключення активної індуктивності до колектора VT1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним опором [3]. Резонансна частота коливального контуру залежить від дії магнітної індукції на сенсор Холла. Еквівалентна схема частотного перетворювача магнітної індукції представлена на рис. 2. Вона враховує нелінійні властивості схеми, тому що автогенератор може працювати як у лінійному, так і нелінійному режимах.

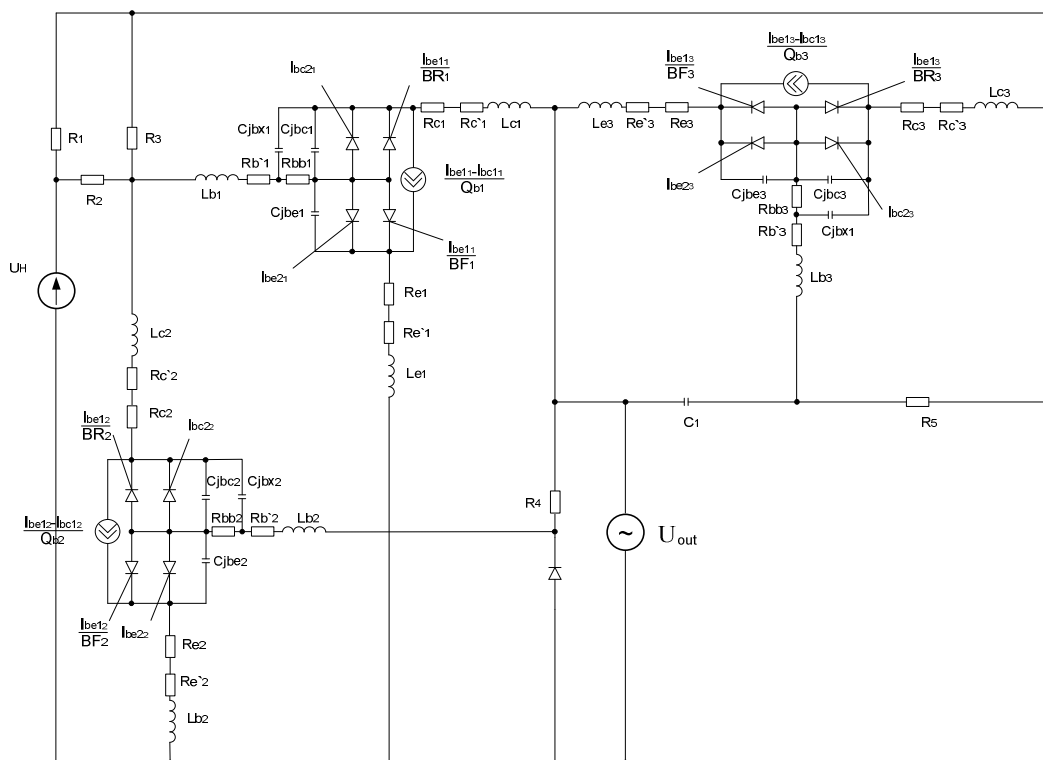


Рисунок 2 – Еквівалентна схема частотного перетворювача магнітної індукції

Для зручності розрахунків еквівалентну схему подано у вигляді рис. 3. Вольт-амперна характеристика має ділянку від'ємного опору, що дозволяє компенсувати втрати енергії в коливальному контурі, який утворений еквівалентною ємністю транзисторів VT1 та VT2 (рис. 1) і активною індуктивністю.

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від магнітної індукції. Це можливо зробити, розв'язавши систему рівнянь Кірхгофа, яка складена для змінного струму на основі еквівалентної схеми (рис. 3). Вирішення системи рівнянь (1) дозволяє отримати величину повного опору на електродах колектор-емітер перетворювача. При розкладі повного опору на дійсну і уявну складові можна визначити еквівалентну ємність коливального контуру, яка залежить від магнітної індукції. Система рівнянь Кірхгофа, згідно напрямкам контурних струмів, має вигляд:

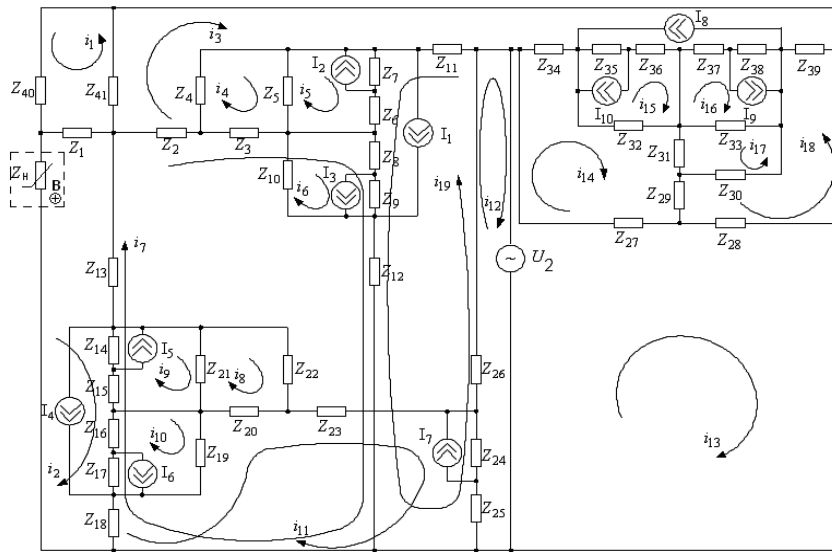


Рисунок 3 – Перетворена нелінійна еквівалентна схема частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів

$$\begin{cases}
 0 = (Z_1 + Z_{40} + Z_{41})i_1 + Z_1 i_2 + Z_{41} i_3; \\
 0 = (Z_1 + Z_{13} + Z_{14} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{17} + Z_{18} + Z_H)i_2 + Z_1 i_1 - Z_{13} i_7 + Z_{14}(I_5 - i_9 - I_4 - i_7) - \\
 - Z_{15}(I_4 + i_9 + i_7) - Z_{16}(I_4 + i_{10} + i_7) - Z_{17}(I_4 + I_6 + i_{10} + i_7) - Z_{18} i_7; \\
 0 = (Z_4 + Z_2 + Z_{41} + Z_{39} + Z_{38} + Z_{37} + Z_{36} + Z_{35} + Z_{34} + Z_1)i_3 + Z_{41} i_1 - Z_2 i_7 - Z_4 i_4 + Z_{11} i_{19} - \\
 - Z_{34} i_{14} - Z_{35}(I_8 + I_{10} - i_{15}) - Z_{36}(I_8 + i_{15}) - Z_{37}(I_8 + i_{16}) + Z_{38}(I_9 - I_8 - i_{16}) + Z_{39} i_{18}; \\
 0 = (Z_3 + Z_4 + Z_5)i_4 + Z_4 i_3 - Z_3 i_7 - Z_5 i_5; \\
 0 = (Z_5 + Z_7 + Z_6)i_5 - Z_5 i_4 + Z_7(I_2 + i_{19} - I_1) + Z_6(i_{19} - I_1); \\
 0 = (Z_8 + Z_9 + Z_{10})i_6 + Z_8(i_7 + i_{19} - I_1) + Z_9(i_{19} - I_1 - I_3 + i_7); \\
 0 = (Z_2 + Z_3 + Z_8 + Z_9 + Z_{12} + Z_{18} + Z_{17} + Z_{16} + Z_{15} + Z_{14} + Z_{13})i_7 - Z_2 i_3 - Z_3 i_4 + Z_8(i_6 - \\
 - I_1 + i_{19}) + Z_9(i_6 - I_3 - I_1 + i_{19}) + Z_{12} i_{19} + Z_{18}(i_{11} - i_{12}) + Z_{17}(i_{10} + I_6 - i_2 + I_4) + \\
 + Z_{16}(i_{10} + I_4 - i_2) + Z_{15}(i_9 - i_2 + I_4) + Z_{14}(i_9 - I_5 - i_2 + I_4) - Z_{13} i_2; \\
 0 = (Z_{20} + Z_{21} + Z_{22})i_8 - Z_{21} i_9 - Z_{20} i_{11}; \\
 0 = (Z_{14} + Z_{15} + Z_{21})i_9 + Z_{14}(i_7 - i_2 - I_5 + I_4) + Z_{15}(i_7 - i_2 + I_4) - Z_{21} i_8; \\
 0 = (Z_{16} + Z_{17} + Z_{19})i_{10} + Z_{16}(i_7 - i_2 + I_4) + Z_{17}(i_7 - i_2 + I_4 + I_6) - Z_{19} i_{11}; \\
 0 = (Z_{18} + Z_{20} + Z_{19} + Z_{23} + Z_{24} + Z_{25})i_{11} - Z_{19} i_{10} - Z_{20} i_8 + Z_{24}(I_7 - i_{12} - i_{19}) - \\
 - Z_{25}(i_{12} + i_{19}) + Z_{18}(i_7 - i_2); \\
 \dot{U}_2 = (Z_{25} + Z_{24} + Z_{26})i_{12} + Z_{25}(i_{19} - i_{11}) + Z_{24}(i_{19} - i_{11} - I_7) + Z_{26} i_{19}; \\
 \dot{U}_2 = i_{13}(Z_{27} + Z_{28}) - i_{14} Z_{27} + i_{18} Z_{28}; \\
 0 = i_{14}(Z_{34} + Z_{32} + Z_{31} + Z_{29} + Z_{27}) - i_{15} Z_{32} + i_{17} Z_{31} + i_{18} Z_{29} - i_{13} Z_{27} - i_3 Z_{34}; \\
 0 = i_{15}(Z_{35} + Z_{36} + Z_{32}) + I_{10} Z_{35} + I_8 Z_{35} + I_8 Z_{36} - i_{14} Z_{32} - i_3(Z_{35} + Z_{36}); \\
 0 = i_{16}(Z_{37} + Z_{38} + Z_{33}) - I_9 Z_{38} + I_8 Z_{37} + I_8 Z_{38} + i_{17} Z_{33} - i_3(Z_{37} + Z_{38}); \\
 0 = i_{17}(Z_{31} + Z_{33} + Z_{30}) - i_{18} Z_{30} + i_{14} Z_{31} + i_{16} Z_{33}; \\
 0 = i_{18}(Z_{29} + Z_{39} + Z_{30} + Z_{28}) - i_{14} Z_{29} - i_{17} Z_{30} + i_3 Z_{39} + i_{13} Z_{28}; \\
 0 = i_{19}(Z_{11} + Z_7 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{12} + Z_{25} + Z_{24} + Z_{26}) + I_2 Z_7 + i_5 Z_7 - i_1 Z_7 + \\
 + i_5 Z_6 - I_1 Z_6 + i_6 Z_8 - I_1 Z_8 + i_7 Z_8 - I_3 Z_9 + i_6 Z_9 - I_1 Z_9 + i_7 Z_9 + i_7 Z_{12} + i_{12} Z_{25} - \\
 - i_{11} Z_{25} + i_{12} Z_{24} - I_7 Z_{24} + i_{12} Z_{26} + i_3 Z_{11} - Z_{24} i_{11},
 \end{cases} \quad (1)$$

де  $Z_1 = R_2$ ,  $Z_2 = R_{b1} + j\omega L_{b1}$ ,  $Z_3 = R_{bb1}$ ,  $Z_4 = -j/(\omega C_{bx1})$ ,  $Z_5 = -j/(\omega C_{jbc1})$ ,  $Z_6 = R_8$ ,  $Z_7 = -j/(\omega C_{bc21})$ ,  $Z_8 = R_9$ ,  $Z_9 = -j/(\omega C_{be21})$ ,  $Z_{10} = -j/(\omega C_{jbe1})$ ,  $Z_{11} = R_{c1} + R'_{c1} + j\omega L_{c1}$ ,

$Z_{12} = R_{e1} + R'_{e1} + j\omega L_{e1}$ ,  $Z_{13} = R_{c2} + R'_{c2} + j\omega L_{c2}$ ,  $Z_{14} = -j/(\omega C_{bc22})$ ,  $Z_{15} = R_8$ ,  $Z_{16} = R_9$ ,  
 $Z_{17} = -j/(\omega C_{be22})$ ,  $Z_{18} = R_{e2} + R'_{e2} + j\omega L_{e2}$ ,  $Z_{19} = -j/(\omega C_{jbe2})$ ,  $Z_{20} = R_{bb2}$ ,  
 $Z_{21} = -j/(\omega C_{jbc2})$ ,  $Z_{22} = -j/(\omega C_{bx2})$ ,  $Z_{23} = R_{b2} + j\omega L_{b2}$ ,  $Z_{24} = -j/(\omega C_d)$ ,  $Z_{25} = R_d$ ,  
 $Z_{26} = R_4$ ,  $Z_{27} = -j/(\omega C_1)$ ,  $Z_{28} = R_5$ ,  $Z_{29} = R_{b3} + j\omega L_{b3}$ ,  $Z_{30} = -j/(\omega C_{bx3})$ ,  $Z_{31} = R_{bb3}$ ,  
 $Z_{32} = -j/(\omega C_{jbe3})$ ,  $Z_{33} = -j/(\omega C_{jbc3})$ ,  $Z_{34} = R_{e3} + R'_{e3} + j\omega L_{e3}$ ,  $Z_{35} = -j/(\omega C_{be23})$ ,  
 $Z_{36} = R_{11}$ ,  $Z_{37} = R_{10}$ ,  $Z_{38} = -j/(\omega C_{bc23})$ ,  $Z_{39} = R_{c3} + R'_{c3} + j\omega L_{c3}$ ,  $Z_{40} = R_1$ ,  $Z_{41} = R_3$ ,  
 $Z_H = R_H / (1 + w^2 R_H^2 C_H^2) - jR_H^2 w C_H / (1 + w^2 R_H^2 C_H^2)$ ,  $R'_b$  - омичний опір базового електроду,  $R_b$  -  
 опір бази,  $L_b$  - індуктивність базового електроду,  $C_{jbc}$  - ємність колекторного переходу,  $C_{jbe}$  - єм-  
 ність емітерного переходу,  $C_{bx}$  - вхідна ємність транзистора,  $R'_c$  - омичний опір колекторного електро-  
 ду,  $R_c$  - опір колекторного переходу,  $L_c$  - індуктивність колекторного електроду,  $R'_e$  - омичний опір  
 емітерного електроду,  $R_e$  - опір емітерного переходу,  $R_H$  - опір холлівського елемента,  $C_H$  - ємність  
 холлівського елемента,  $L_e$  - індуктивність емітерного електроду,  $R_1, R_2, R_3, R_4$  - опори дільника.

Ємність емітерного переходу [4]:

$$C_{be} = C_{едиф} + C_{ебар}, C_{едиф} = \tau / (m_e \cdot \varphi_T) (I_{едиф} - I_{be0}), C_{ебар} = C_{ебар0} [U_{кон.е} / (U_{кон.е} - U_e)]^{n_e},$$

де  $C_{едиф}$ ,  $C_{ебар}$  - дифузійна та бар'єрна ємності емітерного переходу,  $\tau$  - ефективний час життя неос-  
 новних носіїв бази при нормальному включенні біполярного транзистора,  $C_{ебар0}$  - бар'єрна ємність  
 емітерного переходу при нульовій напрузі зміщення,  $U_{кон.е}$  - контактна різниця потенціалу емітерного  
 переходу,  $n_e$  - коефіцієнт, який залежить від характеру переходу.

Ємність колекторного переходу [4]:

$$C_{bc} = C_{сдиф} + C_{сбар}, C_{сдиф} = \frac{\tau_i}{m_c \cdot \varphi_T} (I_{сдиф} - I_{bc0}), C_{сбар} = C_{сбар0} [U_{кон.с} / (U_{кон.с} - U_c)]^{n_c},$$

де  $C_{сдиф}$ ,  $C_{сбар}$  - дифузійна та бар'єрна ємності колекторного переходу,  $\tau_i$  - ефективний час життя  
 неосновних носіїв бази при інверсному включенні біполярного транзистора,  $C_{сбар0}$  - бар'єрна ємність  
 переходу при нульовій напрузі зміщення,  $U_{кон.с}$  - контактна різниця потенціалу колекторного переходу,  
 $n_c$  - коефіцієнт, який залежить від характеру колекторного переходу.

Джерела струмів  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9, I_{10}$  описуються виразами [5, 6]:

$$I_1 = \frac{I_{be1} - I_{bc1}}{Q_{b1}}, I_4 = \frac{I_{be2} - I_{bc2}}{Q_{b2}}, I_8 = \frac{I_{be3} - I_{bc3}}{Q_{b3}},$$

$$I_2 = I_{bc1} / \beta_i, I_3 = I_{be1} / \beta_N, I_5 = I_{bc2} / \beta_N, I_6 = I_{bc2} / \beta_i, I_7 = I_b / \beta_i, I_9 = I_{bc3} / \beta_i, I_{10} = I_{be3} / \beta_N,$$

де  $I_{bc}$ ,  $I_{be}$  - струм база-колектор та струм база-емітер,  $\beta_i$  - статистичний коефіцієнт передачі струму в  
 інверсному режимі,  $\beta_N$  - статистичний коефіцієнт передачі струму в нормальному режимі,  $I_{едиф}$  - ди-  
 фузійна складова емітерного струму,  $I_{сдиф}$  - дифузійна складова колекторного струму.

Струми база-емітер  $I_{be}$  і база-колектор  $I_{bc}$  описуються виразами [5]:

$$I_{be} = I_{be0} [\exp(U_{be} / (m_e \phi_T)) - 1], \quad I_{bc} = I_{bc0} [\exp(U_{bc} / (m_c \phi_T)) - 1],$$

де  $I_{be0}$ ,  $I_{bc0}$  - теплові струми емітерного і колекторного переходів,  $U_{be}$ ,  $U_{bc}$  - напруги на переходах база-емітер та база-колектор,  $m_e$ ,  $m_c$  - коефіцієнти неідеальності транзисторів,  $\phi_T$  - температурний потенціал.

Дифузійна складова емітерного та колекторного струмів описуються виразами [7]:

$$I_{edif} = I_{be0} [\exp(U_{be} / (m_e \phi_T)) - 1], \quad I_{cdif} = I_{bc0} [\exp(U_{bc} / (m_c \phi_T)) - 1].$$

Опір бази визначається як сума двох складових

$$R_b = R_{b0} + R_{b\partial}, \quad (2)$$

де  $R_{b0}$  - омичний опір матеріалу бази,  $R_{b\partial}$  - дифузійний опір.

Омичний опір матеріалу бази визначається формулою

$$R_{b0} = \rho \left[ \frac{1}{2W} + \frac{l}{aW_1} \right], \quad (3)$$

де  $\rho$  - питомий опір матеріалу бази,  $a$ ,  $l$ ,  $W$ ,  $W_1$  - ширина, довжина та товщина активної та пасивної частини базової області транзистора.

Дифузійний опір  $R_{b\partial}$  визначається формулою

$$R_{b\partial} = \frac{kT}{2qI_e(1-h_{12b})}. \quad (4)$$

З врахуванням (3) та (4) формула (2) набуває вигляду

$$R_b = \rho \left[ \frac{1}{2W} + \frac{l}{aW_1} \right] + \frac{kT}{2qI_e(1-h_{12b})}. \quad (5)$$

Опір емітера визначається згідно [5]

$$R_e = \frac{kT}{qI_e}.$$

Опір колекторного переходу визначається виразом [5]

$$R_c = \frac{WU_c}{I_e d_c (1-h_{21b})},$$

де  $W$  - ширина бази,  $d_c$  - шар об'ємного заряду колекторного переходу,  $h_{21b}$  - коефіцієнт передачі струму.

Для спрощення запису системи рівнянь Кірхгофа введемо наступні позначення:

$$\begin{cases}
B_1 = Z_1 + Z_{40} + Z_{41}; \\
B_2 = Z_1 + Z_{13} + Z_{14} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{17} + Z_{18} + Z_H; \\
B_3 = Z_4 + Z_2 + Z_{41} + Z_{39} + Z_{38} + Z_{37} + Z_{36} + Z_{35} + Z_{34} + Z_{11}; \\
B_4 = Z_3 + Z_4 + Z_5; \\
B_5 = Z_5 + Z_7 + Z_6; \\
B_6 = Z_8 + Z_9 + Z_{10}; \\
B_7 = Z_2 + Z_3 + Z_8 + Z_9 + Z_{12} + Z_{18} + Z_{17} + Z_{16} + Z_{15} + Z_{14} + Z_{13}; \\
B_8 = Z_{20} + Z_{21} + Z_{22}; \\
B_9 = Z_{14} + Z_{15} + Z_{21}; \\
B_{10} = Z_{16} + Z_{17} + Z_{19}; \\
B_{11} = Z_{18} + Z_{19} + Z_{20} + Z_{23} + Z_{24} + Z_{25}; \\
B_{12} = Z_{25} + Z_{24} + Z_{26}; \\
B_{13} = Z_{27} + Z_{28}; \\
B_{14} = Z_{34} + Z_{32} + Z_{31} + Z_{29} + Z_{27}; \\
B_{15} = Z_{35} + Z_{36} + Z_{32}; \\
B_{16} = Z_{37} + Z_{38} + Z_{33}; \\
B_{17} = Z_{31} + Z_{33} + Z_{30}; \\
B_{18} = Z_{29} + Z_{30} + Z_{39} + Z_{28}; \\
B_{19} = Z_{11} + Z_7 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{12} + Z_{25} + Z_{24} + Z_{26}.
\end{cases} \quad (6)$$

Тоді система (3.1) набуває вигляду :

$$\begin{cases}
0 = B_1 i_1 + Z_1 i_2 + Z_{41} i_3; \\
0 = B_2 i_2 + Z_1 i_1 - Z_{13} i_7 + Z_{14} (I_5 - i_9 - I_4 - i_7) - Z_{15} (I_4 + i_9 + i_7) - Z_{16} (I_4 + i_{10} + i_7) - \\
- Z_{17} (I_4 + I_6 + i_{10} + i_7) - Z_{18} i_7; \\
0 = B_3 i_3 + Z_{41} i_1 - Z_2 i_7 - Z_4 i_4 + Z_{11} i_{19} - Z_{34} i_{14} - Z_{35} (I_8 + I_{10} - i_{15}) - \\
- Z_{36} (I_8 + i_{15}) - Z_{37} (I_8 + i_{16}) + Z_{38} (I_9 - I_8 - i_{16}) + Z_{39} i_{18}; \\
0 = B_4 i_4 + Z_4 i_3 - Z_3 i_7 - Z_5 i_5; \\
0 = B_5 i_5 - Z_5 i_4 + Z_7 (I_2 + i_{19} - I_1) + Z_6 (i_{19} - I_1); \\
0 = B_6 i_6 + Z_8 (i_7 + i_{19} - I_1) + Z_9 (i_{19} - I_1 - I_3 + i_7); \\
0 = B_7 i_7 - Z_2 i_3 - Z_3 i_4 + Z_8 (i_6 - I_1 + i_{19}) + Z_9 (i_6 - I_3 - I_1 + i_{19}) + Z_{12} i_{19} + Z_{18} (i_{11} - i_2) + \\
+ Z_{17} (i_{10} + I_6 - i_2 + I_4) + Z_{16} (i_{10} + I_4 - i_2) + Z_{15} (i_9 - i_2 + I_4) + Z_{14} (i_9 - I_5 - i_2 + I_4) - Z_{13} i_2; \\
0 = B_8 i_8 - Z_{21} i_9 - Z_{20} i_{11}; \\
0 = B_9 i_9 + Z_{14} (i_7 - i_2 - I_5 + I_4) + Z_{15} (i_7 - i_2 + I_4) - Z_{21} i_8; \\
0 = B_{10} i_{10} + Z_{16} (i_7 - i_2 + I_4) + Z_{17} (i_7 - i_2 + I_4 + I_6) - Z_{19} i_{11}; \\
0 = B_{11} i_{11} - Z_{19} i_{10} - Z_{20} i_8 + Z_{24} (I_7 - i_{12} - i_{19}) - Z_{25} (i_{12} + i_{19}) + Z_{18} (i_7 - i_2); \\
U_2 = B_{12} i_{12} + Z_{25} (i_{19} - i_{11}) + Z_{24} (i_{19} - i_{11} - I_7) + Z_{26} i_{19}; \\
\dot{U}_2 = i_{13} B_{13} - i_{14} Z_{27} + i_{18} Z_{28}; \\
0 = i_{14} B_{14} - i_{15} Z_{32} + i_{17} Z_{31} + i_{18} Z_{29} - i_{13} Z_{27} - i_3 Z_{34}; \\
0 = i_{15} B_{15} + I_{10} Z_{35} + I_8 Z_{35} + I_8 Z_{36} - i_{14} Z_{32} - i_3 (Z_{35} + Z_{36}); \\
0 = i_{16} B_{16} - I_9 Z_{38} + I_8 Z_{37} + I_8 Z_{38} + i_{17} Z_{33} - i_3 (Z_{37} + Z_{38}); \\
0 = i_{17} B_{17} - i_{18} Z_{30} + i_{14} Z_{31} + i_{16} Z_{33}; \\
0 = i_{18} B_{18} - i_{14} Z_{29} - i_{17} Z_{30} + i_3 Z_{39} + i_{13} Z_{28}; \\
0 = i_{19} B_{19} + I_2 Z_7 + i_5 Z_7 - i_1 Z_7 + i_5 Z_6 - I_1 Z_6 + i_6 Z_8 - I_1 Z_8 + i_7 Z_8 - I_3 Z_9 + i_6 Z_9 - \\
- I_1 Z_9 + i_7 Z_9 + i_7 Z_{12} + i_{12} Z_{25} - i_{11} Z_{25} + i_{12} Z_{24} - I_7 Z_{24} + i_{12} Z_{26} + i_3 Z_{11} - Z_{24} i_{11}.
\end{cases} \quad (7)$$

На основі розв'язку системи рівнянь (7) за допомогою пакета прикладних програм "Matlab 6.2" був визначений повний опір на електродах транзисторів VT1 та VT2. Розрахунки повного опору структури дозволяють отримати всі необхідні теоретичні залежності. На рис. 4. показана теоретична та експериментальна залежність активної та реактивної складової повного опору. При проведенні експериментальних досліджень в якості еталонного засобу вимірювань використано гаусметр 1-ST із роздільною здатністю 0,1 Гс (0,01 мТл) в діапазоні магнітної індукції від 0,1 Гс до 19 999,9 Гс (від 0,01 мТл до 1999, 99 мТл).

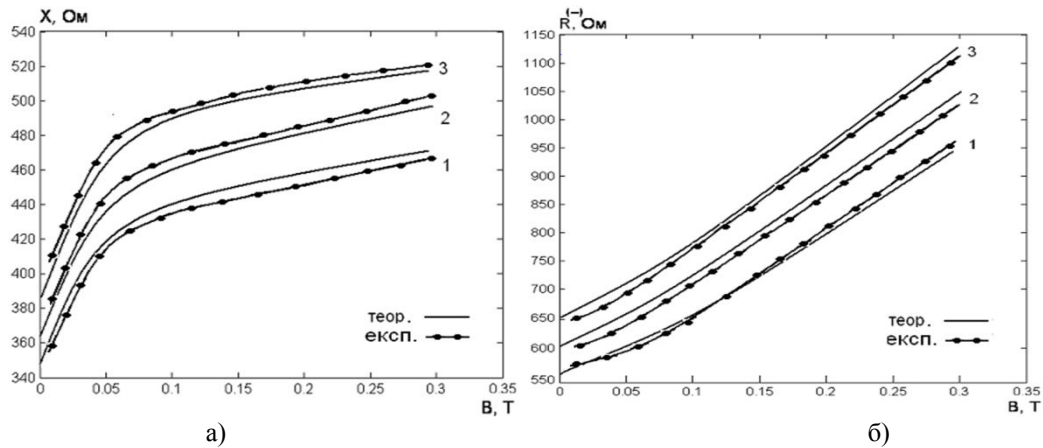


Рисунок 4 – Залежності реактивної (а) та активної (б) складової повного опору при напругах живлення: 1-5В, 2-5,5В, 3- 6В

Відповідно до методу Ляпунова визначена функція перетворення пристрою, що являє собою залежність частоти генерації від величини магнітної індукції. Аналітична залежність функції перетворення:

$$F = \frac{1}{4} \frac{V_1 R_H(B) + \sqrt{V_1^2 R_H^2(B) - 4 R_H^2(B) (C_H^2(B) C_{be3} + C_H^2(B) C_{bc1} + C_H(B) C_{be3} C_{bc1}) V_2}}{\pi R_H^2(B) (C_H^2(B) C_{be3} + C_H^2(B) C_{bc1} + C_H(B) C_{be3} C_{bc1})}; \quad (8)$$

де  $V_1 = C_{bc1} C_{be3}$ ;  $V_2 = C_{bc1} + C_{be3}$ .

Графічна залежність функції перетворення представлена на рис. 5 Чутливість перетворювача визначається на підставі виразу (9) і описується рівнянням

$$\begin{aligned} S_B^F = & -0.5((2C_H(B)C_{be3}(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B}) + 2C_H(B)C_{bc1}(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B}) + (\frac{\partial C_H(B)}{\partial B})C_{be3}C_{bc1})V_2) + \\ & + (V_1^2 - 4(C_H^2(B)C_{be3} + C_H^2(B)C_{bc1} + C_H(B)C_{be3}C_{bc1})V_2)^{1/2} R_H(B)\pi(C_H^2(B)C_{be3} + C_H^2(B) \times \\ & \times C_{bc1} + C_H(B)C_{be3}C_{bc1})) - \frac{1}{4}((V_1^2 - 4(C_H^2(B)C_{be3} + C_H^2(B)C_{bc1} + C_H(B)C_{be3}C_{bc1})V_2)^{1/2}) \times \\ & \times (\frac{\partial R_H(B)}{\partial B}) / (R_H^2(B)\pi(C_H^2(B)C_{be3} + C_H^2(B)C_{bc1} + C_H(B)C_{be3}C_{bc1})) - \frac{1}{4}(V_1 + (V_1^2 - 4(C_H^2(B) \times \\ & \times C_{be3} + C_H^2(B)C_{bc1} + C_H(B)C_{be3}C_{bc1})V_2)^{1/2})(2C_H^2(B)C_{be3}(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B}) + 2C_H(B)C_{bc1} \times \\ & \times (\frac{\partial C_H(B)}{\partial B})) + C_{be3}C_{bc1}(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B}))) / (\pi R_H(B)(C_H^2(B)C_{be3} + C_H^2(B)C_{bc1} + C_H(B)C_{be3}C_{bc1})^2). \end{aligned} \quad (9)$$

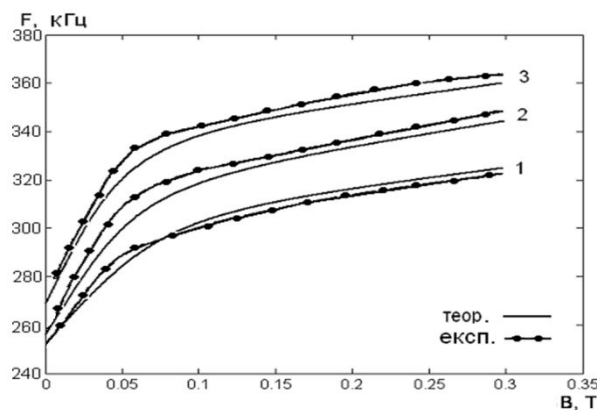


Рисунок 5 – Залежність частоти генерації частотного перетворювача від величини магнітної індукції при напругах живлення: 1-5В, 2-5,5В, 3-6В

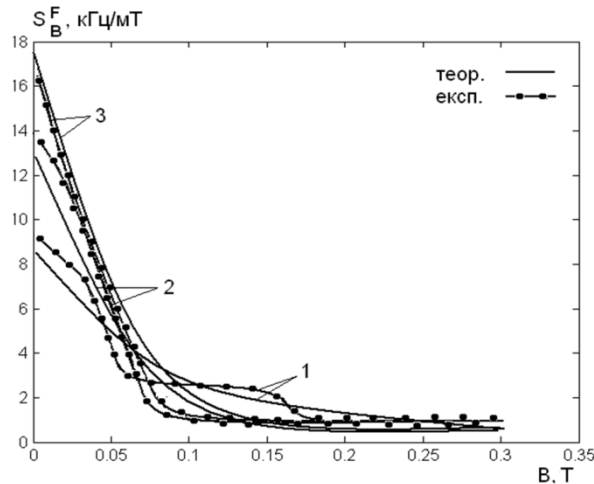


Рисунок 6 – Залежність частоти генерації частотного перетворювача від величини магнітної індукції при напругах живлення: 1-5В, 2-5,5В, 3-6В

Графік залежності чутливості представлений на рис.3.6. Як видно з графіка, найбільша чутливість пристрою лежить у діапазоні від 0,01 мТл до 300 мТл і складає 2-18 кГц/мТл.

### Висновки

1. Запропонована мікроелектронна схема перетворювача магнітної індукції у частотний сигнал з магніточутливим елементом Холла.
2. Розроблена математична модель перетворювача на основі рівнянь Кірхгофа, що описують поведінку схеми, на основі якої отримані аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості.
3. Чутливість перетворювача складає 2-18 кГц/мТл в діапазоні магнітної індукції від 0,01 мТл до 300 мТл.

### Список літератури

1. Popovic R.S. Hall effect devices. - Bristol ; Philadelphia : Institute of Physics, 2004. - 419 p.
  2. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. - М. : ДМК Пресс, 2001. - Т.1. - 364 с.
  3. HAL805. Programmable Linear Hall Effect Sensor. Preliminary Data Sheet "Micronas", 2000. - 24 p.
  4. Новицкий П.В., Кноринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. - Л.: Энергия, 1970. - 424 с.
  5. Осадчук О.В. Микроэлектронные частотные преобразователи на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением. - Винница: « Универсум-Винница», 2000. - 303 с.
  6. Осадчук В.С, Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. - Винница: «Универсум-Винница», 1999. - 275 с.
  7. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем: Пер. с англ. - М.: Мир, 1991.- 327 с.
  8. PSPICE User's guide. MicroSim Corporation. La Cadena Drive, Laguna Hills, 1989. - 450 p.
  9. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЗВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств. - М.: Радио и связь, 1992. - 72 с.
  10. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЗВМ. Выпуск 3. Моделирование аналоговых устройств. - М.: Радио и связь, 1992. -120 с.
- Стаття надійшла: 08.02.2011.

### Відомості про авторів

**Осадчук Володимир Степанович** – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри електроніки ВНТУ, (0432)-58-20-45, osadchuk69@mail.ru.

**Осадчук Олександр Володимирович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки ВНТУ (0432)- 59-84-81, osadchuk69@mail.ru.

**Мартинюк Володимир Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки ВНТУ, (0432)-59-80-13, toihtoide@i.ua.

**Білилівська Ольга Петрівна** – аспірант кафедри електроніки ВНТУ, (0432)-59-80-13, stovbcha@mail.ru.