

УДК 621.307

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЧАСТОТНОГО МАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ З УПРАВЛЯЮЧИМ p-n ПЕРЕХОДОМ

Док.техн. наук, проф. Осадчук В.С., канд.техн. наук Осадчук О.В.

Одним з перспективних напрямків мікроелектроніки є розробка частотних функціональних перетворювачів, в яких активну роль відіграють не тільки складові активні елементи, але і зворотні зв'язки між ними, що приводить до появи диференціального від'ємного опору. Існування додаткового об'ємного каналу зв'язку суттєво підвищує функціональні можливості таких елементів, а також підвищує стабільність і надійність роботи приладів. Магніточутливі властивості діодних та транзисторних структур, як носіїв аналогових сигналів, добре досліджені в роботах [1,2]. Однак слід підкреслити, що властивості частотних магніточутливих перетворювачів майже не досліджені, хоча застосування частоти як інформативного параметру, дозволяє відмовитись від аналого-цифрових перетворювачів, що значно здешевлює пристрої керування і контролю.

В даній роботі зроблена спроба розробити математичну модель частотного магнітного перетворювача на основі польових транзисторів з управляючим p-n переходом з від'ємним опором. Схема магніточутливого перетворювача подана на рис.1. Вона складається з двох комплементарних польових транзисторів, один з яких є магніточутливим елементом. Магнітне поле діє перпендикулярно

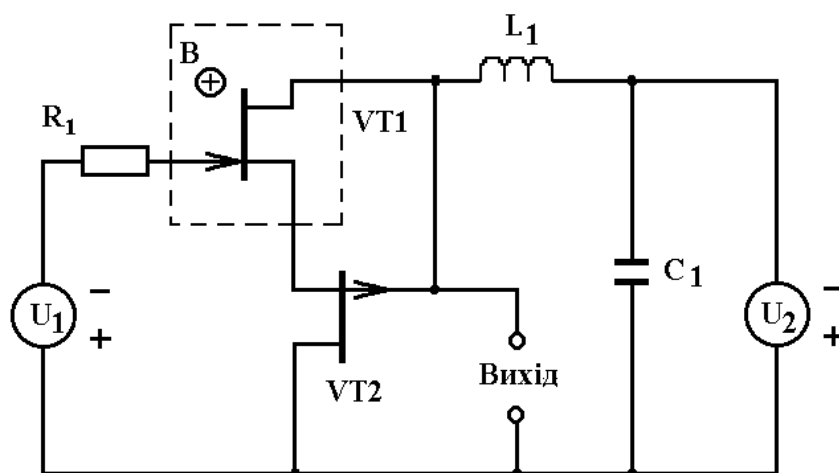


Рис.1. Електрична схема магніточутливого перетворювача.

руху зарядів в каналі і сила Лоренца відхиляє їх до затвору при позитивному напрямку вектора магнітної індукції  $B$  і до напівпровідникової підкладки при зворотному напрямку вектора індукції (рис.2). Згідно цього рисунку, струм стоку визначається [3]:

$$I_c = \sigma \cdot E_x Z(a - h(x)), \quad (1)$$

де  $\sigma = q\mu_n N_d$  - питома провідність каналу,  $E_x$  - напруженість електричного поля в каналі,  $a$  - товщина каналу,  $Z$  - ширина каналу,  $h(x)$  - товщина шару об'ємного заряду p-n переходу,  $q$  - заряд електрона,  $\mu_n$  - рухливість електронів,  $N_d$  - концентрація домішкових донорних атомів в каналі. Напряга на стоку  $U_c$  створює електричне поле із складовою  $E_x$ , яка має напрямок протилежний руху електронів в каналі. Так як

$$E_x = -\frac{dU(x)}{dx}, \quad (2)$$

то при використанні абсолютного значення  $E_x$  можна записати:

$$I_c = q\mu_n N_d \frac{dU(x)}{dx} \cdot Z(a - h(x)), \quad (3)$$

де  $U(x)$  – потенціал в точці з координатою  $x$  відносно витoku. Товщина шару об'ємного заряду управляючого р-п переходу визначається

$$h(x) = \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_o}{qN_d} [U_o + U_3 + U(x)] \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_o$  - діелектричні сталі напівпровідника і вакууму,  $U_o$  - контактна різниця потенціалів р-п переходу,  $U_3$  - напруга на затворі. З врахуванням (4) рішення рівняння (3) має вигляд [3]:

$$I_c = \frac{2aZq\mu_n N_d}{L} \left[ U_c - \frac{2}{3} U_{\text{від}} \left( \frac{U_c + U_3 + U_o}{U_{\text{від}}} \right)^{3/2} + \frac{3}{2} U_{\text{від}} \left( \frac{U_3 + U_o}{U_{\text{від}}} \right)^{3/2} \right], \quad (5)$$

де  $U_{\text{від}} = qN_d a^2 / (2\varepsilon \cdot \varepsilon_o)$  - напруга відсічки каналу,  $L$  – довжина каналу.

З другого боку струм каналу можна визначити, виходячи із поняття загального визначення струму

$$I_c = \frac{Q_n}{t_1}, \quad (6)$$

де  $Q_n$  - загальний заряд, який протікає через канал за час  $t_1$ . Величина  $t_1$  описується виразом

$$t_1 = \frac{L}{V}, \quad (7)$$

де  $V$  – середня швидкість носіїв заряду в каналі, яка залишається незмінною, тому що  $E_x$  і  $\mu_n$  не змінюються. При дії магнітного поля відстань, яку проходять носії заряду, збільшується і становить  $L_1 = L / \cos\varphi$ , згідно рис.2. Тому час проходження каналу носіями заряду при дії магнітного поля дорівнює

$$t_2 = \frac{L_1}{V} = \frac{L}{V \cos\varphi}, \quad (8)$$

де  $\varphi$  - кут Хола.

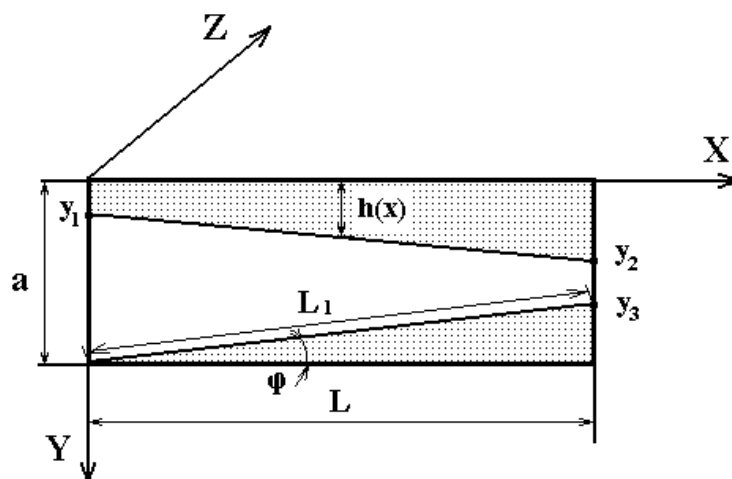


Рис.2. Поперечний розріз каналу n-типу польового транзистора з управляючим р-п переходом.

Використовуючи (8), величину струму через канал при дії магнітного поля можна записати у вигляді

$$I'_c = \frac{Q_n}{t_2} = \frac{Q_n V \cos \varphi}{L} = I_c \cos \varphi. \quad (9)$$

При малих кутах Хола функція  $\cos \varphi$  розкладається в ряд:

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2!} + \frac{\varphi^4}{4!} - \frac{\varphi^6}{6!} + \dots \quad (10)$$

Згідно ефекту магнітоопору відхилення траєкторії руху носіїв заряду від напрямку електричного поля для обмеженого напівпровідника еквівалентно зменшенню довжини вільного пробігу при цьому  $\varphi = \mu_n B$  [1]. З врахуванням цього зауваження і використовуючи (10) із збереженням двох членів розкладу, рівняння (9) приймає вигляд:

$$I'_c = I_c \left(1 - \frac{1}{2} \mu_n^2 B^2\right). \quad (11)$$

З врахуванням (5) вираз (11) описується рівнянням:

$$I'_c = \frac{2aZq\mu_n N_d}{L} \left[ U_c - \frac{2}{3} U_{\text{від}} \left( \frac{U_c + U_3 + U_o}{U_{\text{від}}} \right)^{3/2} + \frac{3}{2} U_{\text{від}} \left( \frac{U_3 + U_o}{U_{\text{від}}} \right)^{3/2} \right] \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \mu_n^2 B^2\right) \quad (12)$$

Таким чином, отримавши залежність струму каналу від індукції магнітного поля  $B$ , перейдемо до визначення залежності струму від напруги Хола. Для цього скористаємося рівнянням [2]:

$$U_{\text{хол}} = A \sigma \cdot (a - y_2) B E_x, \quad (13)$$

де  $A$  – стала Хола. При роботі транзистора в лінійній області, коли  $U_c \ll U_3 + U_o$ , вираз (5) можна розкласти в степеневий ряд, тоді [3]:

$$I'_c = \frac{aZq\mu_n N_d}{L} U_c \cdot \left(1 - \left( \frac{U_3 + U_o}{U_{\text{від}}} \right)^{1/2}\right) \cdot \left(1 - 1/2 \mu_n^2 B^2\right). \quad (14)$$

Слід зауважити, що напруженість електричного поля уздовж каналу не змінюється, тому можна записати

$$E_x = U_{c1} / L, \quad (15)$$

тоді вираз (13) приймає вигляд:

$$U_{хол} = \frac{A\sigma(a - y_2)B}{L} U_{c1}. \quad (16)$$

Із (16) находимо

$$B = \frac{U_{хол} L}{A\sigma(a - y_2)U_{c1}}. \quad (17)$$

Використовуючи (14) і (17), визначимо залежність струму каналу від холівської напруги

$$I'_c = \frac{aZq\mu_n N_d}{L} U_{c1} \cdot \left( 1 - \left( \frac{U_3 + U_o}{U_{\epsilon i \partial}} \right)^{1/2} \right) \left( 1 - \frac{\mu_n^2 U_{хол}^2 L^2}{2A^2 \sigma^2 (a - y_2)^2 U_{c1}^2} \right). \quad (18)$$

На основі (18) визначимо крутизну стоконатворної характеристики

$$S_1 = \left. \frac{dI'_c}{dU_3} \right|_{U_{c1} = const} = \frac{aZq\mu_n N_d U_{c1}}{2U_{\epsilon i \partial} L} \left( 1 - \frac{\mu_n^2 U_{хол}^2 L^2}{2A^2 \sigma^2 (a - y_2)^2 U_{c1}^2} \right) \cdot \left( \frac{U_{\epsilon i \partial}}{U_3 + U_o} \right)^{1/2}. \quad (19)$$

Відносна зміна опору каналу при дії магнітного поля визначається [1]:

$$\Delta R_{кон} = \frac{L\mu_n^2 B^2}{aZq\mu_n N_d}. \quad (20)$$

Еквівалентна ємність резонансного контуру визначається реактивною складовою повного опору на електродах стік-стік польових транзисторів, а повний опір розраховується на основі еквівалентної схеми магнітного перетворювача, поданої на рис.3 [4].

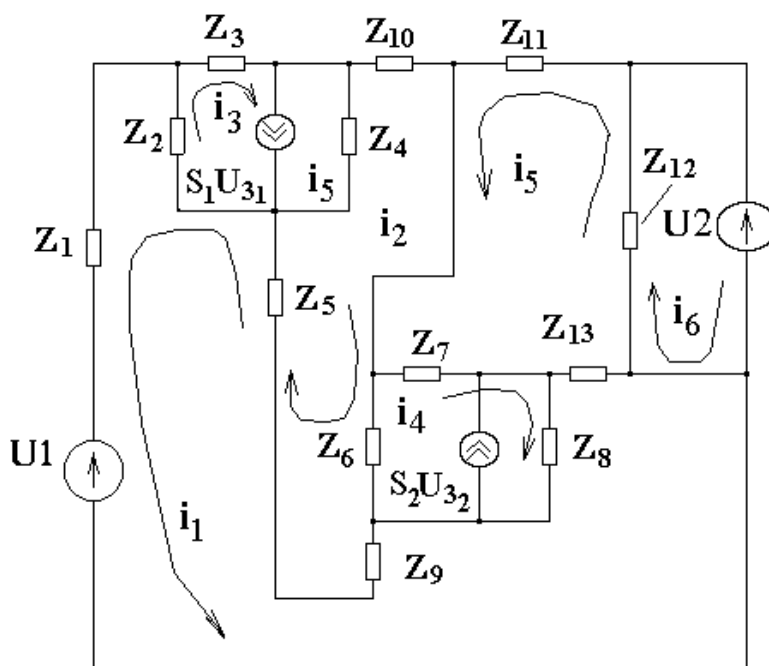


Рис.3. Еквівалентна схема частотного магнітного перетворювача.

Коливальний контур генератора утворений ємнісною складовою повного опору на електродах стік-стік польових транзисторів з управляючими р-п переходами і зовнішньою індуктивністю. Від'ємна активна складова повного опору компенсує втрати в коливальному контурі генератора. Для розрахунку повного опору і визначення функції перетворення на основі еквівалентної схеми визначимо систему рівнянь Кірхгофа.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= (Z_1 + Z_2 + Z_5 + Z_8 + Z_9 + Z_{13})i_1 + Z_2i_3 + (Z_5 + Z_9)i_2 + \\
 &+ Z_8i_4 + S_2Z_8((Z_6 + Z_9)i_2 + Z_9i_1), \\
 0 &= (Z_5 + Z_4 + Z_6 + Z_9 + Z_{10})i_2 + Z_5i_1 - Z_4i_3 + Z_9i_1 - Z_6i_4 + \\
 &+ S_1Z_4((Z_2 + Z_5)i_1 - Z_5i_2), \\
 0 &= (Z_2 + Z_3 + Z_4)i_3 + Z_2i_1 - Z_4i_2 - Z_4S_1(Z_5(i_1 + i_2) + Z_2i_1), \\
 0 &= (Z_6 + Z_7 + Z_8)i_4 - Z_6i_2 + Z_7i_5 + Z_8i_1 + Z_8S_2((Z_6 + Z_9)i_2 + Z_9i_1), \\
 0 &= (Z_{11} + Z_7 + Z_{13} + Z_{12})i_5 + Z_7i_4 - Z_{13}i_1 + Z_{12}i_6,
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

$$U_2 = Z_{12}i_6 + Z_{12}i_5,$$

де

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_{обм}, \quad Z_2 = \frac{R_{31B1}}{1 + (\omega C_{31B1} R_{31B1})^2} - j \frac{R_{31B1}^2 \omega C_{31B1}}{1 + (\omega C_{31B1} R_{31B1})^2}, \\
 Z_3 &= \frac{R_{31C1}}{1 + (\omega C_{31C1} R_{31C1})^2} - j \frac{R_{31C1}^2 \omega C_{31C1}}{1 + (\omega C_{31C1} R_{31C1})^2}, \quad Z_4 = R_{1кан}, \\
 Z_5 &= R_{B1}, \quad Z_6 = \frac{R_{32B2}}{1 + (\omega C_{32B2} R_{32B2})^2} - j \frac{R_{32B2}^2 \omega C_{32B2}}{1 + (\omega C_{32B2} R_{32B2})^2}, \\
 Z_7 &= \frac{R_{32C2}}{1 + (\omega C_{32C2} R_{32C2})^2} - j \frac{R_{32C2}^2 \omega C_{32C2}}{1 + (\omega C_{32C2} R_{32C2})^2}, \quad Z_8 = R_{2кан}, \quad Z_9 = R_{B2}, \\
 Z_{10} &= R_{C1}, \quad Z_{11} = j\omega L_1, \quad Z_{12} = 1/j\omega C_1, \quad Z_{13} = R_{C2},
 \end{aligned}$$

$S_1$  – крутизна магніточутливого транзистора VT1,  $S_2$  – крутизна польового транзистора VT2.

Значення параметрів елементів еквівалентної схеми (рис.3) для теоретичних розрахунків отримано з робіт [5,6]. Рішення системи рівнянь (21) проведено чисельним методом на персональному комп'ютері.

Вплив магнітного поля на еквівалентну ємність резонансного контуру передається через крутизну магніточутливого польового транзистора, яка є узагальненим параметром, що характеризує роботу транзистора, а також зміну опору каналу.

Функція перетворення у загальному вигляді описується рівнянням:

$$\omega_o = [L_1 C_{екв}(B)]^{-1/2}, \tag{22}$$

де  $\omega_o$  - резонансна частота,  $L_1$ - зовнішня індуктивність коливального контуру,  $C_{екв}$  - еквівалентна ємність коливального контуру, яка визначається на основі рішення системи рівнянь (21) числовим методом. Чутливість частотного перетворювача визначається з рівняння (22):

$$\frac{d\omega_o}{dB} = -\frac{1}{2} L_1 [L_1 C_{екв}(B)]^{-3/2} \frac{dC_{екв}}{dB}. \tag{23}$$

Теоретична і експериментальна залежності резонансної частоти від магнітної індукції подані на рис.4. Чутливість магнітного перетворювача склала  $1,12 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}^2$ .

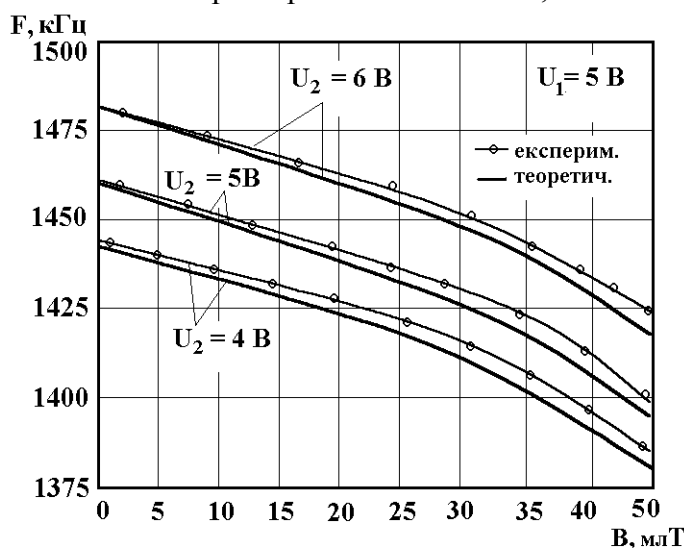


Рис.4. Залежність резонансної частоти від магнітної індукції.

Експериментальні дослідження проводились за стандартною методикою [7], причому в якості магніточутливого елемента використовувався безкорпусний транзистор типу КП103. Величина магнітної індукції вимірювалась за допомогою приладу типа Щ4310.

### Висновки

Розроблена математична модель частотного магнітного перетворювача на основі польових транзисторів з управляючим р-п переходом, яка дозволила отримати аналітичну залежність резонансної частоти і параметрів елементів еквівалентної схеми від магнітної індукції.

### Література

1. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. –М.: Сов. Радио, 1975. –104 с.
2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. –М.: Радио и связь, 1990. –264с.
3. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высшая школа, 1991. –351 с.
4. Осадчук В.С., Осадчук Е.В., Осадчук А.В. Полупроводниковый датчик магнитного поля. Патент Российской Федерации № 2068568, Бюл. №30, 1996.
5. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 выпусках. Вып.2: Модели компонентов аналоговых устройств. –М.: Радио и связь, 1992. –72 с.
6. Готра З.Ю. Технология микросхемотехнических устройств: Справочник. –М.: Радио и связь, 1991. –528 с.
7. Электрические измерения. Под редакцией Е.Г.Шрамкова.–М.:Высшая школа,1972. –519с.

Кафедра мікроелектроніки, оргтехніки та зв'язку