

УДК 621.317

В.С.ОСАДЧУК, О.В.ОСАДЧУК, В.В.МАРТИНЮК

## СЕНСОР МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ ДВОКОЛЕКТОРНОГО МАГНІТОТРАНЗИСТОРА

*Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця - 21021, Україна  
Тел.: (0432) 59-84-81; e-mail: osadchuk69@mail.ru*

**Анотація.** У даній роботі представлені дослідження частотного сенсора магнітного поля на основі двоколекторного магніточутливого біполярного транзистора і двозатворного польового транзистора. Отримані аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості. Теоретичні і експериментальні дослідження показали, що чутливість розробленого частотного сенсора магнітного поля складає 100-200 Гц/мТ.

**Аннотация.** В данной работе представлены исследования частотного сенсора магнитного поля на основе двухколлекторного магниточувствительного биполярного транзистора и двухзатворного полевого транзистора. Получены аналитические зависимости функции преобразования и уравнение чувствительности. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что чувствительность разработанного частотного сенсора магнитного поля составляет 100-200 Гц/мТ.

**Abstract.** In the article operation the investigations frequency sensor of a magnetic field are represented on the basis of two-collector magnetic sensitive bipolar transistor and two gate of the field-effect transistor. The analytical dependences of function of conversion and equation of sensitivity are obtained. The theoretical and experimental investigations have shown, that the sensitivity designed makes frequency sensor of a magnetic field 100-200 Hz/mT.

**Ключові слова:** сенсор магнітного поля, від'ємний опір, двоколекторний магнітотранзистор, частотний сенсор.

### ВСТУП

Дослідження магнітного поля є основою фундаментальних наукових досліджень, за допомогою яких визначається будова і склад речовини, розробляються ядерні джерела енергії, досліджується космічний простір, розробляються методи діагностики у техніці та медицині [1].

Більшість сенсорів магнітного поля є аналоговими, за допомогою яких магнітна індукція перетворюється в електричний сигнал у вигляді напруги або струму. Сенсори магнітного поля з частотним виходом мають ряд переваг перед аналоговими, це полягає у значному підвищенні заводостійкості, що дозволяє збільшити точність вимірювання, а також у можливості одержання значних вихідних сигналів. Це створює можливість відмови від підсилювальних пристроїв при наступній обробці сигналів. Використання частотного сигналу в якості інформативного дозволяє відмовитись від аналого-цифрових перетворювачів, що підвищує економічність вимірювальної апаратури.

В даний час ведуться інтенсивні дослідження з вивчення властивостей аналогових сенсорів магнітного поля [2,3], хоча дослідження частотних сенсорів магнітного поля знаходяться в початковій стадії [4]. Використання магніточутливого двоколекторного біполярного транзистора як у якості чутливого, так і в якості підсилювального елемента дозволило значно спростити схему пристрою. Дана робота присвячена дослідженню магнітного частотного сенсора на основі такої схеми.

### ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Електрична схема сенсора магнітного поля наведена на рис.1. Вона являє собою гібридну інтегральну схему, що складається із двоколекторного магніточутливого транзистора і польового двозатворного транзистора, які разом з індуктивністю і джерелом постійної напруги, утворюють автогенераторний пристрій, частота генерації якого залежить від індукції магнітного поля.

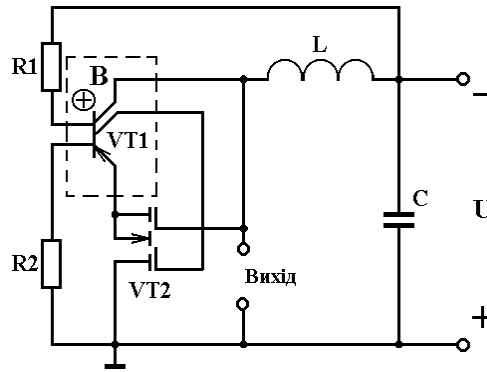


Рис.1. Електрична схема частотного сенсора магнітного поля

На електродах першого колектора магніточутливого біполярного транзистора VT1 і стоці польового двозатворного транзистора VT2 існує повний опір, активна складова якого має від’ємне значення, а реактивна – емнісний характер. Підключення зовнішньої індуктивності L до першого колектора магніточутливого транзистора VT1 і стоку польового транзистора VT2 через закорочуючу емність C створює коливальний контур автогенератора. Втрати енергії в коливальному контурі компенсуються від’ємним опором. Резистори R1 і R2, а також джерело постійної напруги U забезпечують режим живлення з постійного струму досліджуваної схеми. При дії магнітного поля на транзистор VT1 відбувається зміна еквівалентної емності коливального контуру, що викликає зміну резонансної частоти.

Еквівалентна схема, частотного сенсора магнітного поля подана на рис.2. Вона побудована на основі малосигнальних лінійних еквівалентних схем біполярного і польового транзисторів.

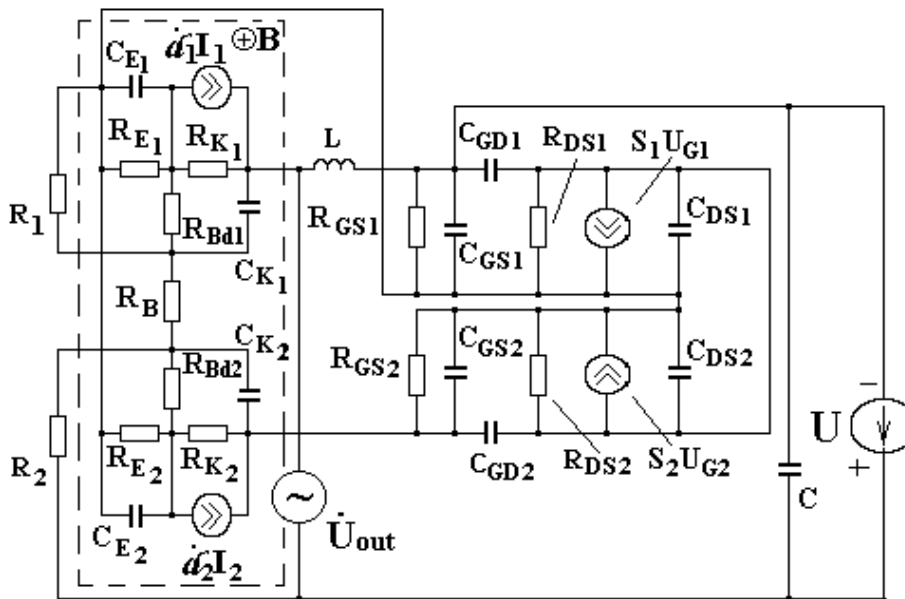


Рис.2. Еквівалентна схема частотного сенсора магнітного поля

Розглянемо залежність елементів еквівалентної схеми магніточутливого двоколекторного транзистора від дії магнітного поля. Виходячи з аналітичних залежностей параметрів еквівалентної схеми [5] визначаються їх залежність від магнітного поля. Омичний опір базової області залежить від дії магнітного поля наступним чином

$$R_B = R_{B0}(1 + c\mu_p^2 B^2), \quad (1)$$

де  $R_{B0}$  - опір базової області без дії магнітного поля,  $\mu_p$  - рухливість дірок,  $c$  - коефіцієнт, який залежить від механізму розсіювання дірок,  $B$  - магнітна індукція.

Залежність опору емітерного переходу від дії магнітного поля описується виразом

$$R_E = \frac{kT(1 + c\mu_p^2 B^2)}{qI_0 \cdot \exp(qU_{E0} / kT)}, \quad (2)$$

де  $k$  - постійна Больцмана,  $T$  - температура,  $q$  - заряд електрона,  $I_0$  - зворотний струм емітерного р-п переходу,  $U_{E0}$  - постійна напруга на емітерному переході магніточутливого транзистора. Дифузійна ємність емітерного переходу залежить від дії магнітного поля у відповідності з формулою

$$C_E = \frac{qI_0\tau_p \cdot \exp(qU_{E0}/kT)}{kT(1 + c\mu_p^2 B^2)}, \quad (3)$$

де  $\tau_p$  - час життя дірок. Ємність колекторного переходу описується виразом

$$C_K = S \left[ \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2U_K\mu_p\rho_0(1 + c\mu_p^2 B^2)} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

де  $S$  - площа колекторного переходу,  $\rho_0$  - питомий опір базової області,  $U_K$  - зворотна напруга колекторного переходу магніточутливого транзистора,  $\varepsilon, \varepsilon_0$  - діелектрична проникність напівпровідникового матеріалу базової області й вакууму, відповідно.

Залежність, коефіцієнта передачі струму в схемі із загальною базою в області низьких частот від дії магнітного поля можна представити у вигляді

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{W_0}{L_p(1 + c\mu_p^2 B^2 / 2)} \right]^2, \quad (5)$$

де  $L_p$  - дифузійна довжина дірок,  $W_0$  - товщина бази без дії магнітного поля.

Таким чином, визначивши залежності елементів еквівалентної схеми магніточутливого транзистора від дії магнітного поля, перейдемо до визначення функції перетворення й рівняння чутливості.

Для цього перетворимо загальну еквівалентну схему (рис.2) на еквівалентну схему для змінного струму (рис.3), оскільки вона дозволяє розрахувати повний опір на електродах першого колектора транзистора VT1 і стоку польового транзистора VT2, на основі якого визначається еквівалентна ємність коливального контуру магнітного сенсора, що визначає функцію перетворення.

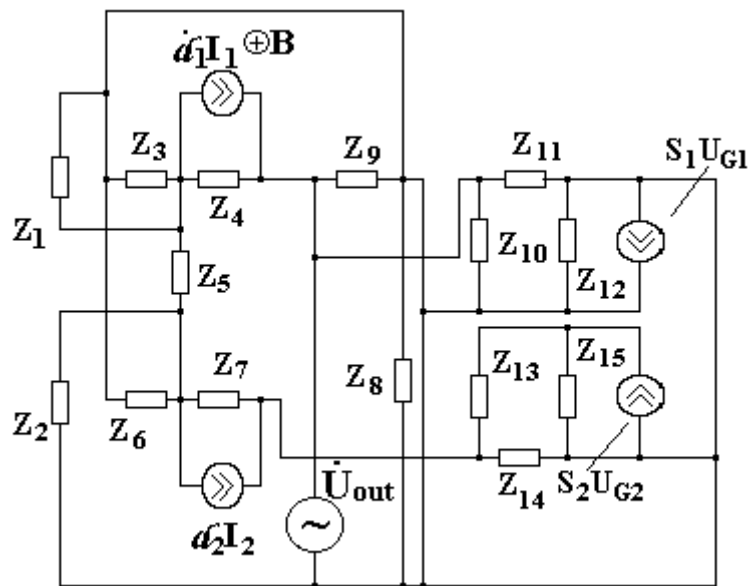


Рис.3. Еквівалентна схема частотного сенсора магнітного поля із змінного струму

де

$$\begin{aligned}
 Z_1 = R_1, \quad Z_2 = R_2, \quad Z_3 = \frac{R_{E1}}{1 + \omega^2 R_{E1}^2 C_{E1}^2} - j \frac{R_{E1}^2 \omega C_{E1}}{1 + \omega R_{E1}^2 C_{E1}^2}, \quad Z_4 = \frac{R_{K1}}{1 + \omega^2 R_{K1}^2 C_{K1}^2} - j \frac{R_{K1}^2 \omega C_{K1}}{1 + \omega R_{K1}^2 C_{K1}^2}, \\
 Z_5 = R_B, \quad Z_6 = \frac{R_{E2}}{1 + \omega^2 R_{E2}^2 C_{E2}^2} - j \frac{R_{E2}^2 \omega C_{E2}}{1 + \omega R_{E2}^2 C_{E2}^2}, \quad Z_7 = \frac{R_{K2}}{1 + \omega^2 R_{K2}^2 C_{K2}^2} - j \frac{R_{K2}^2 \omega C_{K2}}{1 + \omega R_{K2}^2 C_{K2}^2}, \\
 Z_8 = -j/(\omega C), \quad Z_9 = j\omega L, \quad Z_{10} = \frac{R_{GS1}}{1 + \omega^2 R_{GS1}^2 C_{GS1}^2} - j \frac{R_{GS1}^2 \omega C_{GS1}}{1 + \omega R_{GS1}^2 C_{GS1}^2}, \quad Z_{11} = -j/(\omega C_{GD1}), \\
 Z_{12} = \frac{R_{DS1}}{1 + \omega^2 R_{DS1}^2 C_{DS1}^2} - j \frac{R_{DS1}^2 \omega C_{DS1}}{1 + \omega R_{DS1}^2 C_{DS1}^2}, \quad Z_{13} = \frac{R_{GS2}}{1 + \omega^2 R_{GS2}^2 C_{GS2}^2} - j \frac{R_{GS2}^2 \omega C_{GS2}}{1 + \omega R_{GS2}^2 C_{GS2}^2}, \\
 Z_{14} = -j/(\omega C_{GD2}), \quad Z_{15} = \frac{R_{DS2}}{1 + \omega^2 R_{DS2}^2 C_{DS2}^2} - j \frac{R_{DS2}^2 \omega C_{DS2}}{1 + \omega R_{DS2}^2 C_{DS2}^2}.
 \end{aligned}$$

У відповідності із схемою (рис.3) на основі методу стійкості Ляпунова [5] визначаємо функцію перетворення, яка являє собою залежність частоти генерації від індукції магнітного поля. Аналітична залежність функції перетворення має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + LC_{GD}(C_B(B)R_B(B))^2}}{2LC_{GD}(R_B(B)C_B(B))^2}}, \quad (6)$$

де

$$A_1 = LC_{GD} - (C_B(B)R_B(B))^2 - C_{GD}C_B(B)R_B^2(B),$$

$L$  - зовнішня індуктивність,  $C_B, R_B$  - еквівалентна ємність й опір базової області магніточутливого транзистора,  $C_{GD}$  - ємність затвор-стік польового транзистора.

Графічна залежність функції перетворення подана на рис.4. Чутливість сенсора магнітного поля визначається на основі виразу (6) і описується рівнянням

$$\begin{aligned}
 S_B^{F_0} = -0.0198 \left( -2C_B(B)R_B^3(B)C_{GD} \left( \frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) \times \sqrt{A_1 + 2A_2} - 2C_B^2(B)R_B^3(B) \left( \frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) - 2C_B^3(B) \times \right. \\
 \times R_B^2(B) \left( \frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) - 3C_B(B)R_B^3(B)C_{GD} \left( \frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) - 2C_{GD}C_B^2(B)R_B^2(B) \left( \frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) + 8C_B^2(B)R_B^3(B)L \times \\
 \times C_{GD} \left( \frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) + 8LC_{GD}C_B^2(B)R_B^2(B) \left( \frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) + 4LC_{GD}R_B(B) \left( \frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) \sqrt{A_1 + 2A_2} + 4R_B(B) \times \\
 \times \left( \frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) LC_{GD} + 4C_B(B)LC_{GD} \left( \frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) \times \sqrt{A_1 + 2A_2} + 4LC_{GD}C_B(B) \times \\
 \left. \times \left( \frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) \right) / \left( \left( 2\sqrt{A_1 + \sqrt{A_1 + 2A_2}} / A_2 \right) LC_{GD}C_B^3(B)R_B^3(B)\sqrt{A_1 + 2A_2} \right), \quad (7)
 \end{aligned}$$

де

$$A_2 = 2LC_{GD}(C_B(B)R_B(B))^2.$$

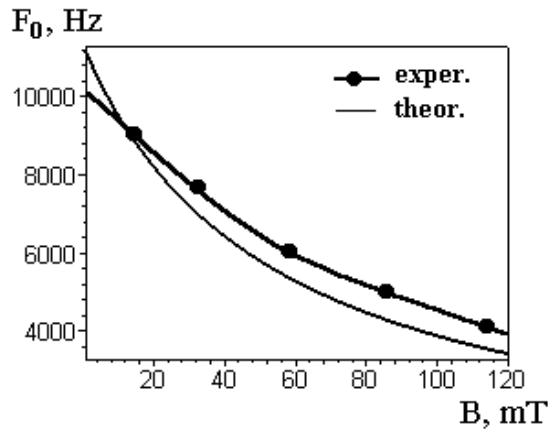


Рис.4. Залежність частоти генерації від індукції магнітного поля

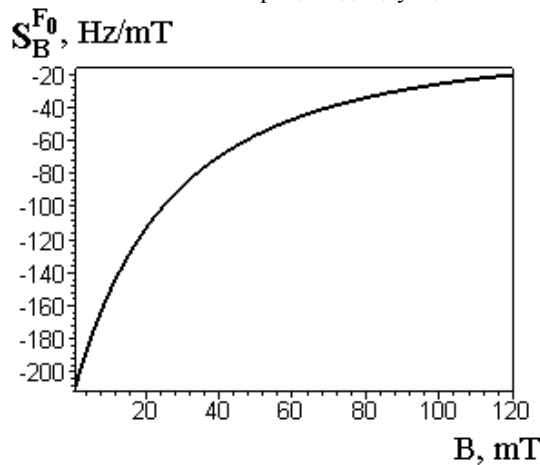


Рис.5. Залежність чутливості від індукції магнітного поля

Графік залежності чутливості від магнітної індукції подано на рис.5. Як видно із графіка найбільша чутливість пристрою лежить у діапазоні від 0 до 60 мТ і становить 200-60 Гц/мТ.

#### ВИВОДИ

Показана можливість прямого перетворення індукції магнітного поля в частоту на основі гібридної інтегральної схеми, яка складається з двоколекторного магніточутливого транзистора і польового двозатворного транзистора. Отримано аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що чутливість сенсора складає 100-200 Гц/мТ.

#### ЛІТЕРАТУРА

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

**ОСАДЧУК В.С.** – Академік АНУ, д.т.н., проф., зав. кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет.

**ОСАДЧУК О.В.** – д.т.н., проф., зав. кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет.

**МАРТИНЮК В.В.** – асистент кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет.