

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.383

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.;

О. В. Осадчук, д. т. н., доц.

МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Показано можливість прямого перетворення індукції магнітного поля в частоту на основі гібридної інтегральної схеми автогенератора, який складається з двоколекторного магніточутливого транзистора, польового двозатворного транзистора і двох біполярних транзисторів, один з яких з RC-колом реалізує активну індуктивність коливального контуру автогенератора. Отримано аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що чутливість перетворювача складає 6,5 ГГц/мТ.

Вступ

Вимірювання параметрів магнітного поля дозволяє дослідити будову речовини, властивості космічного простору, процеси в термоядерних джерелах енергії, здійснити пошук корисних копалин, визначити якість феромагнітних матеріалів, розробити методи діагностики в техніці та медицині [1].

На теперішній час у всіх галузях вимірювальної техніки (окрім телеметрії) використовуються виключно такі перетворювачі, в яких вихідною величиною є величина струму або напруги. Це призводить до значних похибок вимірювання, втрат інформації в каналі між виходом перетворювача і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, малих потужностей вихідного сигналу перетворювачів, їх низькою завадостійкістю і швидкодією. З іншого боку, видатні досягнення мікроелектронної технології в основному були реалізовані в засобах обробки інформації та обчислювальної техніки, в яких значна номенклатура функціональних елементів вийшла на 7—8 рівень інтеграції із застосуванням базових технологічних процесів. Проте електронна система контролю і управління також потребує впровадження досягнень мікроелектронної технології, насамперед, для вимірювальних перетворювачів магнітного поля.

Тому одним з перспективних напрямків у розробці вимірювальних перетворювачів магнітного поля є використання залежності реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових пристроїв від впливу магнітного поля і створення на цій основі мікроелектронних частотних перетворювачів магнітного поля [2, 3]. У пристроях такого типу відбувається перетворення магнітної індукції у частотний сигнал, що дозволяє створювати вимірювальні перетворювачі за інтегральною технологією і дає можливість підвищити точність, чутливість і швидкодію, розширити діапазон вимірюваних величин, поліпшити завадостійкість і надійність. Окрім того, поєднання на одному кристалі вимірювального перетворювача із схемами обробки інформації уможливує створення «інтелектуальних» сенсорів магнітного поля. Використання частоти як інформативного параметру дозволяє уникнути застосування підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів при обробці інформації, що знижує вартість систем контролю і управління.

Застосування активної індуктивності на основі біполярного транзистора із RC-колом замість пасивного індуктивного елемента коливального контуру автогенератора дає можливість виготовити схему частотного перетворювача повністю за інтегральною технологією. Окрім того, активна індуктивність має від'ємний опір, що також підвищує добротність коливального контуру, а отже, і чутливість приладу. Дослідженню цих питань присвячена ця робота.

Теоретичні і експериментальні дослідження

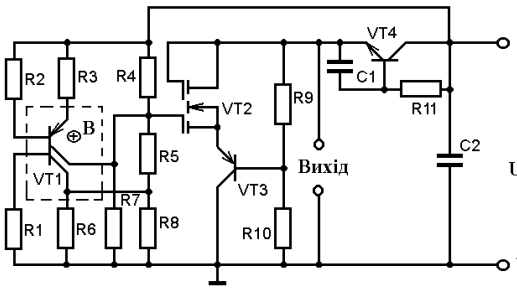


Рис. 1. Електрична схема частотного перетворювача магнітного поля з активним індуктивним елементом

а реактивна — смісний характер. Підключення активного індуктивного елемента на основі біполярного транзистора VT4 і R11C1-кола до стоку польового двозатворного транзистора VT2 та до загальної шини через закорочувальну ємність C2 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним опором. Резистори R1...R3, R6, R7 забезпечують режим живлення за постійною напругою магніточутливого транзистора VT1, а резистори R4, R5, R8...R10 — транзисторів VT2, VT3, VT4. Під час дії магнітного поля на транзистор VT1 відбувається зміна еквівалентної ємності коливального контуру, що викликає зміну його резонансної частоти.

Для визначення функції перетворення пристрою необхідно визначити величину індуктивності і добротності активного індуктивного елемента. Величини індуктивності на основі біполярного транзистора VT4 і R11C1 — колом розрахована в роботі [4]

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

$$A_1 = \omega C \left[(r_b - R\alpha_1)^2 - (R\alpha_2)^2 + \frac{1}{(\omega C)^2} \right]; \quad A_2 = \omega C [2R\alpha_2 (r_b - R\alpha_1)];$$

$$A_3 = \left[R\alpha_1 (r_b - R) + r_b \frac{R^2}{r_K} - 2 \frac{R^3}{r_K} \alpha_1 + \frac{R^2 \alpha_2^2}{(\omega C)^2} \right]; \quad A_4 = \left[2R^2 \alpha_1 \alpha_2 - r_b R\alpha_2 + \frac{2R^3}{r_K} \alpha_2 \right],$$

де $\alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2}$ — дійсна складова коефіцієнта передачі струму у схемі із загальною базою;

$\alpha_2 = \frac{\alpha_0 f/f_\alpha}{1 + (f/f_\alpha)^2}$ — уявна складова коефіцієнта передачі струму у схемі із загальною базою;

r_b, r_K — відповідно опір бази і колектора транзистора VT4, f_α — гранична частота біполярного транзистора у схемі із загальною базою; f — робоча частота, $\omega = 2\pi f$ — кругова частота.

Добротність активного індуктивного елемента визначається за формулою [4]

$$Q = \frac{(A_4 A_1 - A_3 A_2) \omega C}{\omega C (A_3 A_1 + A_4 A_2) - (A_1^2 + A_2^2)}. \quad (2)$$

Для отримання залежності частоти генерації від дії магнітного поля необхідно визначити залежність елементів еквівалентної схеми магніточутливого двоколекторного транзистора VT1 від магнітної індукції. Виходячи з аналітичних виразів елементів еквівалентної схеми [5] визначається їх залежність від магнітного поля. Омичний опір базової області залежить від дії магнітного поля таким чином:

$$R_B = R_{B0} (1 + \alpha \mu_p^2 B^2), \quad (3)$$

де R_{B0} — опір базової області без дії магнітного поля, μ_p — рухливість дірок, α — коефіцієнт, який залежить від механізму розсіювання дірок, B — магнітна індукція.

Залежність опору емітерного переходу від дії магнітного поля описується виразом

$$R_E = \frac{kT(1 + \alpha \mu_p^2 B^2)}{qI_0 \exp(qU_{E0}/kT)}, \tag{4}$$

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

$$C_E = \frac{qI_0 \tau_p \exp(qU_{E0}/kT)}{kT(1 + \alpha \mu_p^2 B^2)}, \tag{5}$$

де τ_p — час життя дірок. Ємність колекторного переходу описується виразом

$$C_K = S \left[\frac{\epsilon \epsilon_0}{2U_K \mu_p \rho_0 (1 + \alpha \mu_p^2 B^2)} \right]^{1/2}, \tag{6}$$

де S — площа колекторного переходу; ρ_0 — питомий опір базової області; U_K — зворотна напруга колекторного переходу магніточутливого транзистора; ϵ, ϵ_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 записати у вигляді

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{W_0}{L_p (1 + \alpha \mu_p^2 B^2 / 2)} \right]^2, \tag{7}$$

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

Таким чином, визначивши залежності елементів еквівалентної схеми магніточутливого транзистора VT1 від дії магнітного поля, перейдемо до визначення функції перетворення й рівняння чутливості. Це можна зробити на основі еквівалентної схеми частотного перетворювача магнітного поля, яка показана у загальному вигляді на рис. 2. Перетворимо еквівалентну схему (див. рис. 2) на схему для змінного струму (рис. 3), оскільки нам необхідно розрахувати еквівалентну ємність коливальної контуру автогенератора, яка визначається реактивною складовою повного опору на електродах стоку польового транзистора VT2 і колектора біполярного транзистора VT3.

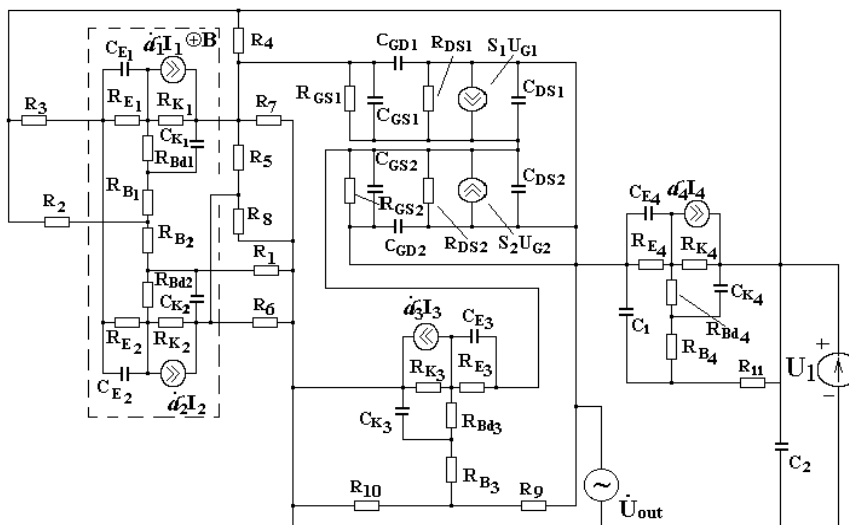


Рис. 2. Загальна еквівалентна схема частотного перетворювача магнітного поля

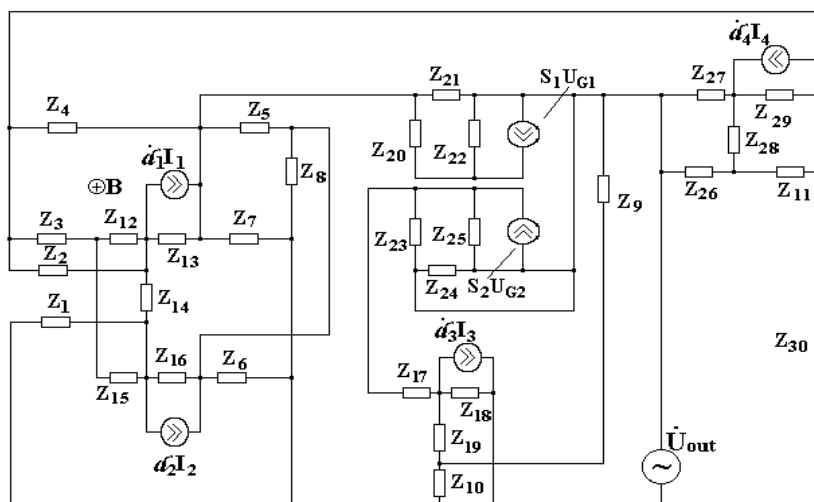


Рис. 3. Еквівалентна схема частотного сенсора магнітного поля із змінного струму

На схемі: $Z_1 = R_1$; $Z_2 = R_2$; $Z_3 = R_3$; $Z_4 = R_4$; $Z_5 = R_5$; $Z_6 = R_6$; $Z_7 = R_7$; $Z_8 = R_8$;

$$Z_9 = R_9; \quad Z_{10} = R_{10}; \quad Z_{11} = R_{12}; \quad Z_{12} = \frac{R_{E1}}{1 + \omega^2 R_{E1}^2 C_{E1}^2} - j \frac{R_{E1} \omega C_{E1}}{1 + \omega R_{E1}^2 C_{E1}^2};$$

$$Z_{13} = \frac{R_{K1}}{1 + \omega^2 R_{K1}^2 C_{K1}^2} - j \frac{R_{K1}^2 \omega C_{K1}}{1 + \omega R_{K1}^2 C_{K1}^2}; \quad Z_{14} = R_{B1} + R_{B2}; \quad Z_{15} = \frac{R_{E2}}{1 + \omega^2 R_{E2}^2 C_{E2}^2} - j \frac{R_{E2}^2 \omega C_{E2}}{1 + \omega R_{E2}^2 C_{E2}^2};$$

$$Z_{16} = \frac{R_{K2}}{1 + \omega^2 R_{K2}^2 C_{K2}^2} - j \frac{R_{K2}^2 \omega C_{K2}}{1 + \omega R_{K2}^2 C_{K2}^2}; \quad Z_{17} = \frac{R_{E3}}{1 + \omega^2 R_{E3}^2 C_{E3}^2} - j \frac{R_{E3}^2 \omega C_{E3}}{1 + \omega R_{E3}^2 C_{E3}^2};$$

$$Z_{18} = \frac{R_{K3}}{1 + \omega^2 R_{K3}^2 C_{K3}^2} - j \frac{R_{K3}^2 \omega C_{K3}}{1 + \omega R_{K3}^2 C_{K3}^2}; \quad Z_{20} = \frac{R_{GS1}}{1 + \omega^2 R_{GS1}^2 C_{GS1}^2} - j \frac{R_{GS1}^2 \omega C_{GS1}}{1 + \omega R_{GS1}^2 C_{GS1}^2}; \quad Z_{19} = R_{B3};$$

$$Z_{21} = -j / (\omega C_{GD1}); \quad Z_{22} = \frac{R_{DS1}}{1 + \omega^2 R_{DS1}^2 C_{DS1}^2} - j \frac{R_{DS1}^2 \omega C_{DS1}}{1 + \omega R_{DS1}^2 C_{DS1}^2}; \quad Z_{24} = -j / (\omega C_{GD2})$$

$$Z_{23} = \frac{R_{GS2}}{1 + \omega^2 R_{GS2}^2 C_{GS2}^2} - j \frac{R_{GS2}^2 \omega C_{GS2}}{1 + \omega R_{GS2}^2 C_{GS2}^2}; \quad Z_{26} = -j / (\omega C_1)$$

$$Z_{25} = \frac{R_{DS2}}{1 + \omega^2 R_{DS2}^2 C_{DS2}^2} - j \frac{R_{DS2}^2 \omega C_{DS2}}{1 + \omega R_{DS2}^2 C_{DS2}^2}; \quad Z_{27} = \frac{R_{E4}}{1 + \omega^2 R_{E4}^2 C_{E4}^2} - j \frac{R_{E4}^2 \omega C_{E4}}{1 + \omega R_{E4}^2 C_{E4}^2};$$

$$Z_{29} = \frac{R_{K4}}{1 + \omega^2 R_{K4}^2 C_{K4}^2} - j \frac{R_{K4}^2 \omega C_{K4}}{1 + \omega R_{K4}^2 C_{K4}^2}; \quad Z_{30} = -j / (\omega C_2); \quad Z_{28} = R_{B4}.$$

На основі еквівалентної схеми (рис. 3) у відповідності із методом рівноваги Ляпунова [6] визначено функцію перетворення, яка описує залежність частоти генерації від індукції магнітного поля. Аналітичний вираз функції перетворення має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4LC_{GD}(C_B(B)R_B(B))^2}}{2LC_{GD}(R_B(B)C_B(B))^2}}, \quad (8)$$

де $A_1 = LC_{GD} - (C_B(B)R_B(B))^2 - C_{GD}C_B(B)R_B^2(B)$; L — індуктивність активного індуктивного елемента, 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.

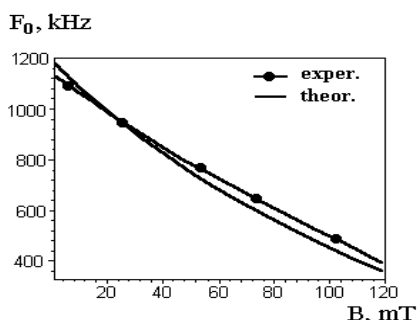


Рис. 4. Залежність частоти генерації від індукції магнітного поля

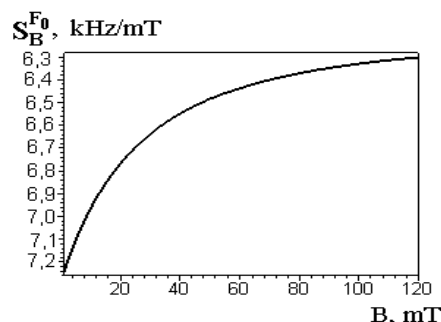


Рис. 5. Залежність чутливості від індукції магнітного поля

Чутливість частотного перетворювача магнітного поля визначається на основі виразу (8) і описується рівнянням

$$\begin{aligned}
 S_B^{F_0} = & -0,0198 \left(-2C_B(B)R_B^3(B)C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) \times \sqrt{A_1 + 2A_2} - 2C_B^2(B)R_B^3(B) \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) - \right. \\
 & - 2C_B^3(B)R_B^2(B) \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) - 3C_B(B)R_B^3(B)C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) - 2C_{GD}C_B^2(B)R_B^2(B) \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) + \\
 & + 8C_B^2(B)R_B^3(B)LC_{GD} \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) + 8LC_{GD}C_B^2(B)R_B^2(B) \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) + 4LC_{GD}R_B(B) \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) \sqrt{A_1 + 2A_2} + \\
 & + 4R_B(B) \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) LC_{GD} + 4C_B(B)LC_{GD} \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) \times \sqrt{A_1 + 2A_2} + 4LC_{GD}C_B(B) \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) \Big/ \\
 & \Big/ \left(\left(2\sqrt{A_1 + \sqrt{A_1 + 2A_2}} / A_2 \right) LC_{GD}C_B^3(B)R_B^3(B)\sqrt{A_1 + 2A_2} \right),
 \end{aligned} \quad (9)$$

де $A_2 = 2LC_{GD}(C_B(B)R_B(B))^2$.

Графік залежності чутливості від магнітної індукції показано на рис. 5. Як видно з графіка, найбільша чутливість пристрою лежить у діапазоні від 0 до 60 мТ і становить 7,2...6,5 кГц/мТ.

Висновки

Показана можливість прямого перетворення індукції магнітного поля в частоту на основі гібридної інтегральної схеми автогенератора, який складається з двоколекторного магніточутливого транзистора, польового двозатворного транзистора і двох біполярних транзисторів, один з яких з РС-колом реалізує активну індуктивність коливальної контури автогенератора. Отримано аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що чутливість перетворювача складає 6,5 кГц/мТ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / За ред. З. Ю. Готри. В 3 т. — 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. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 275 с.
5. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Радио и связь, 1990. — 264 с.
6. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники. — М.: Высшая школа, 1988. — 464 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 14.06.05
Рекомендована до друку 4.07.05

Осадчук Володимир Степанович — завідувач кафедри електроніки; **Осадчук Олександр Володимирович** — завідувач кафедри радіотехніки.

Вінницький національний технічний університет