

УДК 621.307

## МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ЧАСТОТНИЙ МАГНІТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

© Осадчук О.В., 2001

Вінницький державний технічний університет

Розглянута математична модель частотного магнітного перетворювача на основі магніточутливої транзисторної структури з від'ємним опором. Числовим методом проведено розрахунки функції чутливості і перетворення. Подані експериментальні дослідження, які підтвердили справедливність теоретичних положень, розходження теоретичних і експериментальних кривих не перевищує 5%.

### Вступ

Магнітні перетворювачі знаходять широке застосування як в наукових дослідженнях, так і на практиці для виміру індукції магнітного поля [1,2]. В таких перетворювачах інформативним параметром є аналоговий сигнал у формі струму або напруги. Використання в якості магнітного перетворювача транзисторної структури з від'ємним опором дозволяє створити генератор електричних коливань, в якому магніточутливі транзистори виконують роль як ємності, так й індуктивності коливального контуру, а в якості інформативного сигналу використовується частота, що значно підвищує чутливість, швидкодію і економічність. Слід підкреслити, що теоретичні і експериментальні дослідження напівпровідникових діодів і транзисторів у якості аналогових магніточутливих елементів виконані у роботах [1,3]. Проте дослідження частотних магнітних перетворювачів тільки починається [4-6], хоча створення таких перетворювачів дозволяє значно покращити їх характеристики та сполучення з персональним комп'ютером.

### Математична модель магніточутливого перетворювача з активним індуктивним елементом

Схема частотного магнітного перетворювача подана на рис.1. Магніточутливі біполярні транзистори VT1, VT2 і VT3 реалізують генератор електричних коливань, в якому коливальний контур утворений ємнісною складовою повного опору з від'ємним значенням активної складової на електродах колектор-колектор магніточутливих біполярних транзисторів VT1 і VT2 та індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор магніточутливого біполярного транзистора VT3. Таким чином, при дії магнітного поля на магніточутливі біполярні транзистори VT1, VT2 і VT3 змінюється як ємність так і індуктивність коливального контуру генератора, що значно підвищує чутливість перетворювача.

Залежність параметрів еквівалентної схеми біполярних транзисторів VT1 і VT2, які утворюють ємність коливального контуру, від дії магнітного поля розглянута у роботах [5,6]. В даній роботі розглянемо залежність індуктивності контуру від магнітної індукції. Величина індуктивності і добротності індуктивного елемента на основі біполярного транзистора з RC-колом, яка розрахована у роботі [7]. Для аналізу залежності індуктивності від дії магнітного поля скористаємося спрощеною формулою, яка має вигляд

$$L = \left[ \frac{R\dot{\alpha}(r_o - R\dot{\alpha}) - \frac{R^3\dot{\alpha}}{r_k} + \frac{1}{(\omega C)^2} + \frac{R^2}{r_k}(r_o - R\dot{\alpha})}{\omega^2 C \left[ (r_o - R\dot{\alpha})^2 + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]} - \frac{1}{\omega^2 C} \right], \quad (1)$$

де  $\dot{\alpha}$  - комплексний коефіцієнт передачі по струму у схемі із загальною базою транзистора VT3,  $r_o, r_k$  - опір бази і колектора,  $R$  - зовнішній опір,  $C$  - зовнішня ємність,  $\omega$  - кругова робоча частота. Дана формула отримана при умові, що  $r_k \gg R, R \gg r_o, r_o \gg r_e$ . У рівнянні (1) необхідно також враховувати комплексний характер коефіцієнта  $\dot{\alpha}$ .

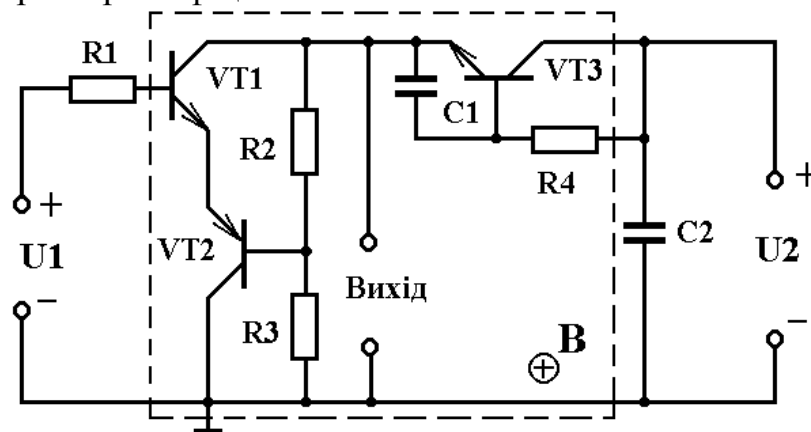


Рис.1. Схема частотного магнітного перетворювача

Добротність індуктивного елемента визначається формулою

$$Q = \frac{\frac{R\dot{\alpha}}{\omega C}(r_o - R\dot{\alpha}) - \frac{R^3\dot{\alpha}}{r_k \omega C} + \frac{1}{(\omega C)^3} + \frac{R^2}{r_k \omega C}(r_o - R\dot{\alpha}) - \frac{1}{\omega C} \left[ (r_o - R\dot{\alpha})^2 + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]}{R \left[ (r_o - R\dot{\alpha})^2 + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right] + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2 (r_o - R\dot{\alpha}) - \frac{R^2}{r_k} \left[ (r_o - R\dot{\alpha})^2 + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right] - \frac{R^2}{r_k (\omega C)^2} - \frac{R^3\dot{\alpha}}{r_k} (r_o - R\dot{\alpha}) - \frac{R\dot{\alpha}}{(\omega C)^2}} \quad (2)$$

Аналіз формул (1) і (2) показує, що вплив на індуктивність і добротність визначається через залежність коефіцієнта  $\dot{\alpha}$ , опору бази  $r_o$  і опору колектора  $r_k$  від магнітної індукції. Якщо зовнішній опір  $R$  також буде магніточутливим матеріалом, то це в значній мірі впливатиме на залежність індуктивності від магнітного поля.

При дії поперечного магнітного поля на базову область біполярного транзистора відбувається скривлення траєкторії інжектованих носіїв заряду,

що еквівалентно зростанню ефективної довжини бази  $W$  при малих значеннях потоку магнітної індукції  $B$ . Це дозволяє вважати сталою величиною рухливість носіїв заряду. Для біполярного транзистора з вузькою базою  $W < L_n$  можна записати [3]

$$W = W_0 / \cos \varphi, \quad (3)$$

де  $W_0$  – довжина бази транзистора без дії магнітного поля,  $\varphi$  - кут Хола, який визначається як  $\varphi = \mu_n B$  [3]. При малих значеннях потоку магнітної індукції, який діє на базову область транзистора,  $\cos \varphi$  можна розкласти у ряд із збереженням двох перших складових розкладу, тоді

$$W = \frac{W_0}{1 - \varphi^2 / 2} = \frac{W_0}{1 - \mu_n^2 B^2 / 2}, \quad (4)$$

де  $\mu_n$  - рухливість інжектованих носіїв заряду.

Перейдемо до визначення залежності параметрів еквівалентної схеми від магнітного поля. Коефіцієнт передачі струму для області малих частот в схемі із загальною базою визначається [3]

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{W}{L_n} \right)^2, \quad (5)$$

де  $L_n$  – дифузійна довжина електронів, якщо використовується транзистор типу n-p-n. У рівняння (5) підставимо (4), тоді

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{W_0}{L_n (1 - \mu_n^2 B^2 / 2)} \right]^2. \quad (6)$$

Опір бази складається із дифузійної і пасивної складових, при цьому дифузійна складова має вигляд [3]

$$R_o = \frac{kT}{2qI_e [1 - \alpha(B)]}, \quad (7)$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура,  $q$  – заряд електрона,  $I_e$  – струм емітера. При підстановці (6) у (7) отримаємо

$$R_o = \frac{kTL_n^2 (1 - \mu_n^2 B^2 / 2)^2}{qI_e W_0^2}. \quad (8)$$

Залежність пасивної складової опору бази від магнітного поля описується рівнянням [3]

$$R_{\pi} = R_{\pi 0} C \mu_n^2 B^2, \quad (9)$$

$R_{\pi 0}$  - опір пасивної частини базової області без дії магнітного поля,  $C$  – стала, яка залежить від механізму розсіювання і геометричних розмірів. Опір колекторного переходу у загальному випадку для біполярного транзистора має вигляд [3]

$$r_k = \frac{WU_K}{I_e d_K [1 - \alpha(B)]}, \quad (10)$$

де  $U_K$  - постійна напруга на колекторному переході,  $d_K$  - товщина шару об'ємного заряду колекторного переходу. Підставляючи (4) і(6) у (10), отримаємо

$$r_K = \frac{2U_K L_n^2 (1 - \mu_n^2 B^2 / 2)}{I_e W_0 d_K} . \quad (11)$$

Таким чином, отримавши залежності параметрів біполярного транзистора від дії магнітного поля і підставляючи (6), (8), (11) у (1) і (2) знайдемо залежність індуктивності і добротності коливального контуру генератора від дії магнітного поля. Слід зауважити, що формули (1) – (11) не зовсім точно описують залежність активної індуктивності від дії магнітного поля, окрім того необхідно врахувати залежність ємнісної складової від магнітного поля, а також врахувати вплив складових активних опорів, які входять як в ємнісну, так і в індуктивну складові повних опорів на електродах колектор-колектор VT1 і VT2, та на електродах емітер-колектор VT3. Тому необхідно розрахувати ці повні опори і на їх основі отримати функції перетворення і чутливості.

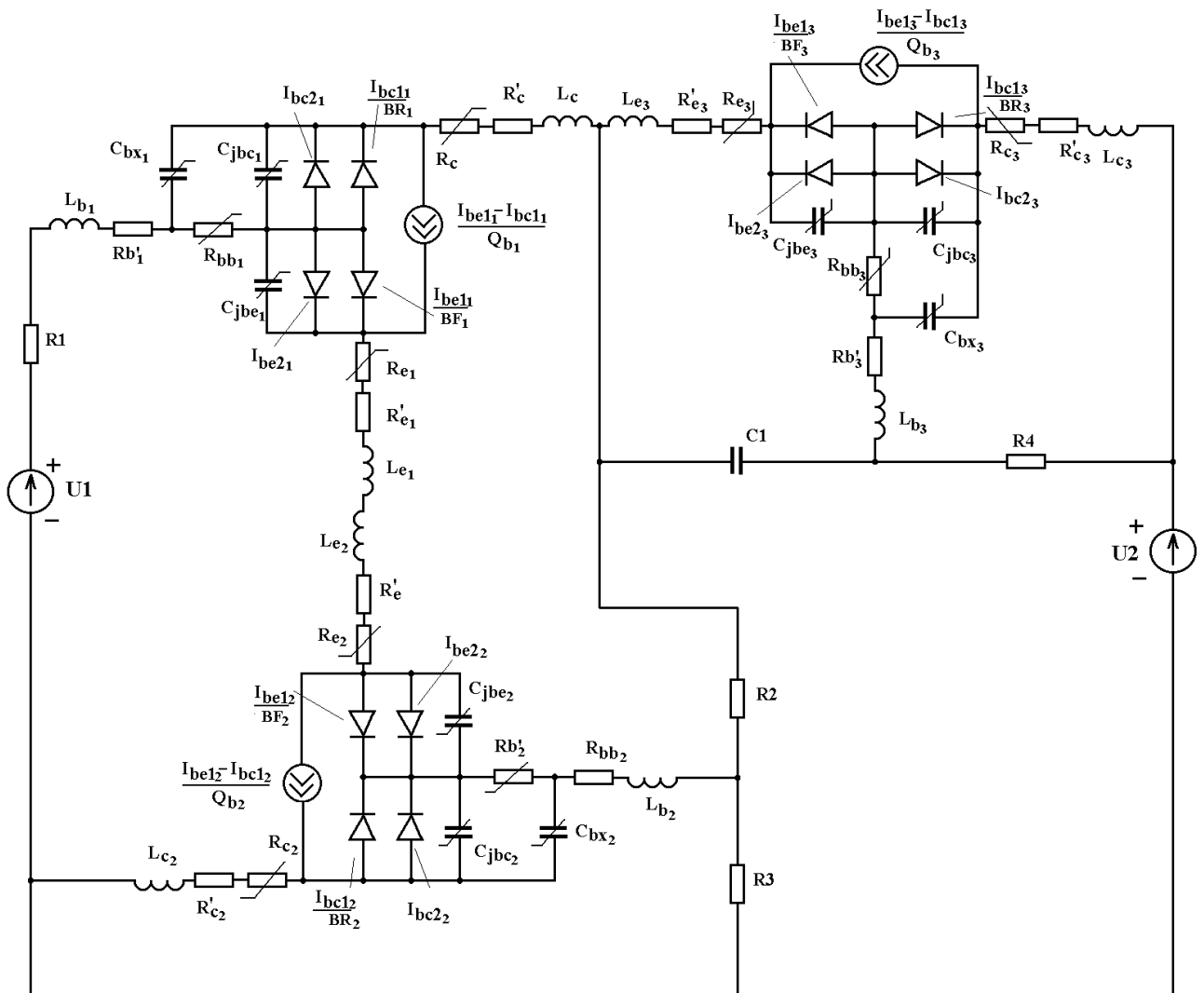


Рис.2. Еквівалентна схема перетворювача

Еквівалентна схема перетворювача, яка містить елементи, що залежать від дії магнітного поля подана на рис.2. Для зручності розрахунків перетворимо її у більш компактну (рис.3). Система рівнянь Кірхгофа, згідно рис.3, має вигляд

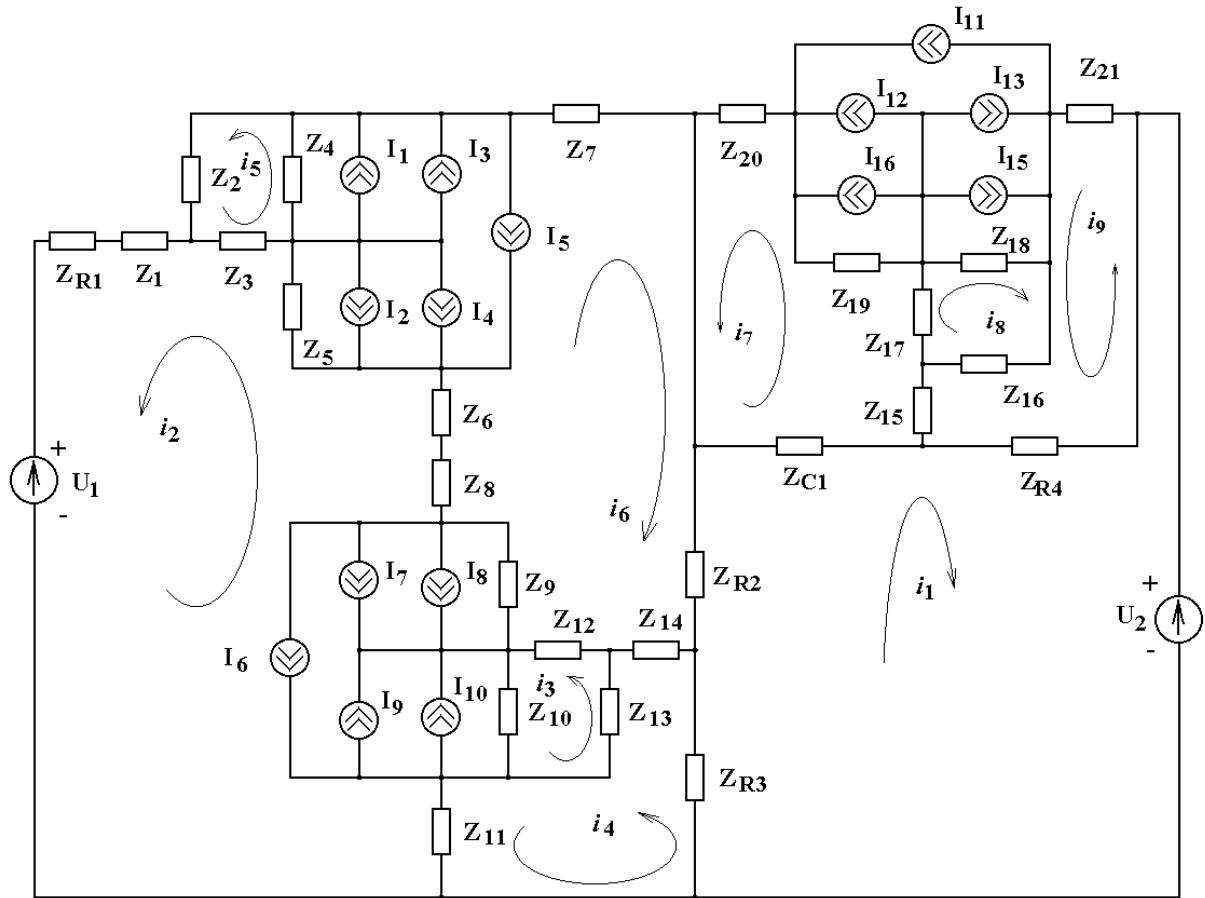


Рис.3. Перетворена еквівалентна схема частотного магнітного перетворювача

$$\left. \begin{aligned}
 U_2 &= (Z_{R3} + Z_{R2} + Z_{C1} + Z_{R4})i_1 + Z_{R3}i_4 - Z_{R2}i_6 + Z_{C1}i_7 + Z_{R4}i_9, \\
 U_1 &= (Z_{R1} + Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11})i_2 - Z_3i_5 - Z_3I_1 - Z_3I_3 + Z_3I_5 + Z_5I_2 + Z_5I_4 + \\
 &+ Z_5I_5 + Z_5i_6 + Z_6i_6 + Z_8i_6 + Z_9i_6 + Z_9I_8 + Z_9I_7 + Z_9I_6 - Z_{10}i_3 - Z_{10}I_{10} - Z_{10}I_9 + Z_{10}I_6 - Z_{11}i_4, \\
 0 &= (Z_{10} + Z_{13} + Z_{12})i_3 - Z_{10}i_2 + Z_{10}I_{10} + Z_{10}I_9 - Z_{10}I_6 - Z_{13}i_4 - Z_{13}I_{10} - Z_{13}I_9 + Z_{13}I_6 + \\
 &+ Z_{12}i_6 - Z_{12}I_{10} - Z_{12}I_9 + Z_{12}I_6, \\
 0 &= (Z_{R3} + Z_{14} + Z_{13} + Z_{11})i_4 + Z_{R3}i_1 + Z_{14}i_6 - Z_{13}i_3 + Z_{13}I_9 + Z_{13}I_{10} - Z_{13}I_6 - Z_{11}i_2, \\
 0 &= (Z_3 + Z_4 + Z_2)i_5 - Z_3i_2 + Z_3I_1 + Z_3I_3 - Z_3I_5 + Z_6i_6 - Z_4I_1 - Z_4I_3 + Z_4I_5 + Z_2I_1 + Z_2I_3 - Z_2I_5, \\
 0 &= (Z_{R2} + Z_{14} + Z_{12} + Z_9 + Z_8 + Z_6 + Z_5 + Z_4 + Z_7)i_6 - Z_{R2}i_1 + Z_{14}i_4 + Z_{12}i_3 - Z_{12}I_9 - Z_{12}I_{10} + Z_{12}I_6 + \\
 &+ Z_9i_2 + Z_9I_8 + Z_9I_7 + Z_9I_6 + Z_8i_2 + Z_6i_2 + Z_5i_2 + Z_5I_4 + Z_5I_2 + Z_5I_5 + Z_4i_5 - Z_4I_1 - Z_4I_3 + Z_4I_5, \\
 0 &= (Z_{C1} + Z_{15} + Z_{17} + Z_{19} + Z_{20})i_7 + Z_{C1}i_1 - Z_{15}i_9 + Z_{17}i_8 - Z_{17}I_{11} + Z_{17}I_{13} + Z_{17}I_{15} - \\
 &- Z_{19}I_{14} - Z_9I_{12} - Z_{19}I_{11}, \\
 0 &= (Z_{18} + Z_{17} + Z_{16})i_8 - Z_{18}I_{13} - Z_{18}I_{15} + Z_{18}I_{11} + Z_{17}i_7 + Z_{17}I_{15} + Z_{17}I_{13} - Z_{17}I_{11} + \\
 &+ Z_{16}i_9 + Z_{16}I_{15} + Z_{16}I_{13} - Z_{16}I_{11}, \\
 0 &= (Z_{21} + Z_{16} + Z_{15} + Z_{R4})i_9 + Z_{16}i_8 + Z_{16}I_{15} + Z_{16}I_{13} - Z_{16}I_{11} - Z_{15}i_7 + Z_{R4}i_1,
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{bc2}; & I_2 &= I_{be2}; & I_3 &= I_{bc1} / \beta_R; & I_4 &= I_{be1} / \beta_F; \\
 I_5 &= (I_{be1} - I_{bc1}) / Q; & I_1 &= I_{10} = I_{15}; & I_2 &= I_8 = I_{14}; & I_3 &= I_9 = I_{13}; \\
 I_4 &= I_7 = I_{12}; & I_5 &= I_6 = I_{11}; & Z_L &= j\omega L; & Z_{R1} &= R_1; \\
 Z_{R2} &= R_2; & Z_{R3} &= R_3; & Z_1 &= R_b' + j\omega L_b; & Z_2 &= -j / \omega C_{bx}; \\
 Z_3 &= R_{bb}; & Z_4 &= -j / \omega C_{jbc}; & Z_5 &= -j / \omega C_{jbe}; & Z_6 &= R_e' + R_e + j\omega L_e; \\
 Z_7 &= R_c' + R_c + j\omega L_c; & Z_1 &= Z_{14} = Z_{15}; & Z_2 &= Z_{13} = Z_{16}; & Z_3 &= Z_{12} = Z_{17}; \\
 Z_4 &= Z_{10} = Z_{18}; & Z_5 &= Z_9 = Z_{19}; & Z_6 &= Z_8 = Z_{20}; & Z_7 &= Z_{11} = Z_{21}.
 \end{aligned}$$

Значення параметрів елементів еквівалентної схеми (рис.3) для теоретичних розрахунків отримано з робіт [8,9]. Розв'язок системи рівнянь (12) проведено чисельним методом на персональному комп'ютері. Вплив магнітного поля на еквівалентні ємність та індуктивність коливального контуру передається через зміну параметрів елементів еквівалентної схеми, тому функція перетворення описується рівнянням

$$\omega_0 = [L_{екв}(B) \cdot C_{екв}(B)]^{-1/2}, \quad (13)$$

де  $\omega_0$  - кругова частота генерації,  $L_{екв}(B)$  - еквівалентна індуктивність коливального контуру,  $C_{екв}(B)$  - еквівалентна ємність коливального контуру генератора, які визначаються на основі розв'язку системи рівнянь (12). Чутливість магнітного частотного перетворювача визначається на основі (13)

$$\frac{d\omega_0}{dB} = -\frac{1}{2} [L_{екв}(B) \cdot C_{екв}(B)]^{-3/2} \left( C_{екв}(B) \frac{dL_{екв}(B)}{dB} + L_{екв}(B) \frac{dC_{екв}(B)}{dB} \right). \quad (14)$$

Теоретична і експериментальна залежності частоти генерації від магнітної індукції подані на рис.4. Чутливість частотного перетворювача складає 3,33 кГц/мТ.

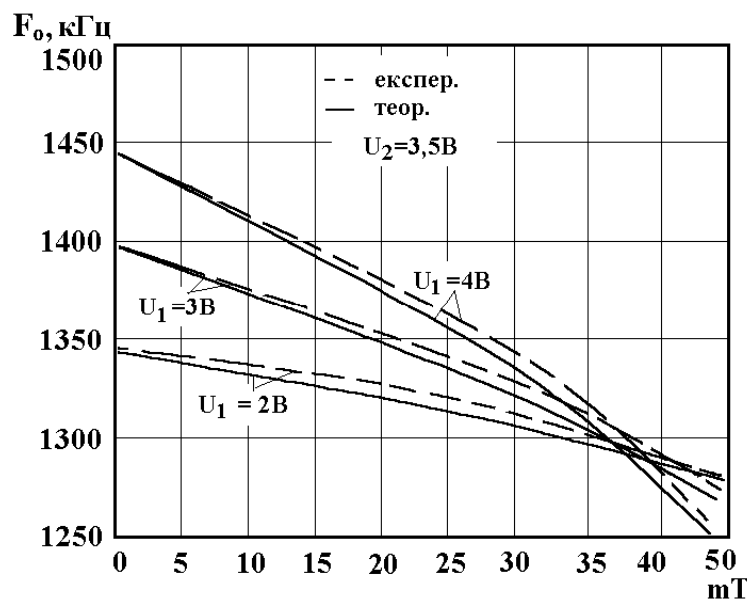


Рис.4. Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації від магнітної індукції

Експериментальні дослідження проводились за стандартною методикою [10], причому в якості магніточутливих елементів використовувались безкорпусні транзистори. Величина магнітної індукції вимірювались за допомогою приладу типу Щ4310.

### Висновки

Розроблена математична модель частотного магнітного перетворювача на основі магніточутливих біполярних транзисторів, які реалізують як ємність, так і індуктивність коливального контуру, що дозволило підвищити чутливість перетворювача. На основі математичної моделі розраховані функція перетворення і чутливість.

### Література

- [1] Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. –М.: Сов. Радио, 1975. –104 с.
- [2] Schaumburg H. Sensoren. Т.3. В.Г. Teubner Stuttgart, 1992. –583 P.
- [3] Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. –М.: Радио и связь, 1990. –264 с.
- [4] Патент Российской Федерации №2068568. Полупроводниковый датчик магнитного поля / Осадчук В.С., Осадчук Е.В., Осадчук А.В. //Бюл. Изобр. – 1996. -№30.
- [5] Осадчук В.С., Осадчук А.В. Исследование частотного магнитного преобразователя на основе транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением // Elektronika ir Elektrotechnika. 1999. №3(21). -P.12-16.
- [6] Осадчук О.В. Математична модель магнітного перетворювача на основі транзисторної структури з від'ємним опором // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 1998. №3. -С.59-63.
- [7] Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: "Універсум-Вінниця", 1999. –275 с.
- [8] Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 выпусках. Вып.3: Моделирование аналоговых устройств. –М.: Радио и связь, 1992. –120 с.
- [9] Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. –М.: Радио и связь, 1991. –528 с.
- [10] Шрамков Е.Г. Электрические измерения. –М.: Высшая школа,1972.–518с.