

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 681.38

В. С. Осадчук, д-р. техн. наук, проф.;
О. В. Осадчук, д-р. техн. наук, проф.;
В. В. Мартинюк, канд. техн. наук;
О. П. Стівбчата, студ.

МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Запропоновано схему мікроелектронного перетворювача магнітної індукції на основі магніточутливого елемента Холла з частотним виходом. Розроблено математичну модель перетворювача, з якої отримано функцію перетворення і рівняння чутливості. Проведено експериментальні дослідження основних параметрів перетворювача. Чутливість перетворювача складає 2...40 кГц/мТ.

Вступ

Моніторинг навколишнього середовища, автоматизація і контроль технологічних процесів потребує сенсорів фізичних величин з досконалими параметрами, зокрема сенсорів магнітного поля. Одним із перспективних наукових напрямків є розробка та створення сенсорів, які реалізують принцип перетворення «магнітна індукція — частота» на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Використання таких сенсорів дає змогу відмовитись від аналого-цифрових перетворювачів, що дозволить знизити собівартість систем контролю та управління, а також створити «інтелектуальні» вимірювальні перетворювачі в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та перетворювача магнітної індукції. Якщо аналогові сенсори магнітного поля добре досліджені, то розробка і дослідження сенсорів магнітного поля з частотним виходом тільки починається [1, 2]. Тому у роботі поставлено за мету провести дослідження мікроелектронного перетворювача магнітної індукції з частотним виходом, в якому магніточутливим елементом слугує елемент Холла.

Математична модель перетворювача

Виконання частотного перетворювача магнітної індукції у вигляді інтегральної схеми потребує застосування плівкової технології для виготовлення пасивного індуктивного елемента у вигляді спіралі, проте її добротність незначна, і по-друге, її розміри на частотах до 10^6 Гц незіставні з розмірами інтегральної схеми перетворювача. Тому для вирішення цієї проблеми запропоновано використати індуктивний характер повного опору біполярного транзистора з RC-колом, яке легко виконується у вигляді інтегральної схеми [3, 4]. Для визначення поведінки перетворювача магнітної індукції в динамічному режимі необхідно отримати залежність активної і реактивної складових повного опору на електродах стік-колектор структури, функції перетворення і чутливості від дії магнітного поля. Розрахунки зроблені на основі еквівалентної схеми МДН- та біполярних транзисторів, з яких складається перетворювач магнітної індукції з чутливим елементом — сенсором Холла (рис. 1).

Еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача магнітної індукції показана на рис. 2. Вона враховує нелі-

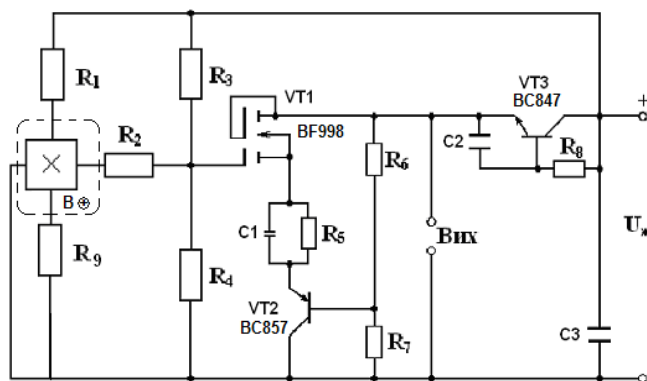


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного перетворювача магнітної індукції з частотним виходом

© В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, О. П. Стівбчата, 2011

нійні властивості схеми, тому що автогенератор може працювати як у лінійному, так і нелінійному режимах. Для зручності розрахунків еквівалентну схему подано у вигляді, показаному на рис. 3.

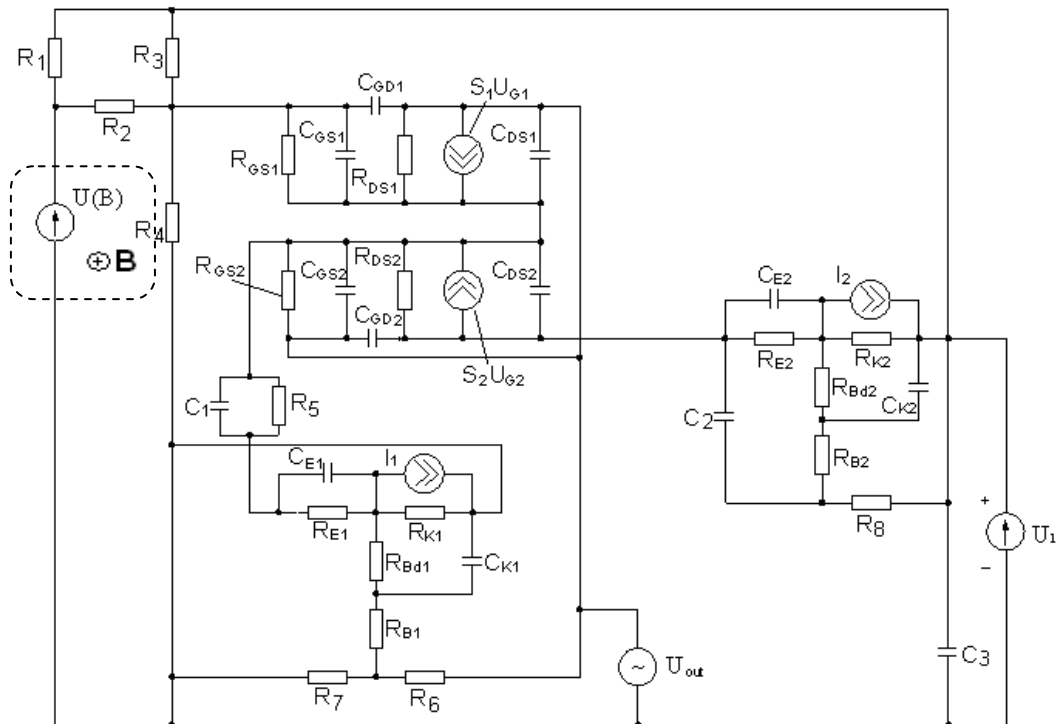


Рис. 2. Нелінійна еквівалентна схема мікроелектронного перетворювача магнітної індукції з частотним виходом

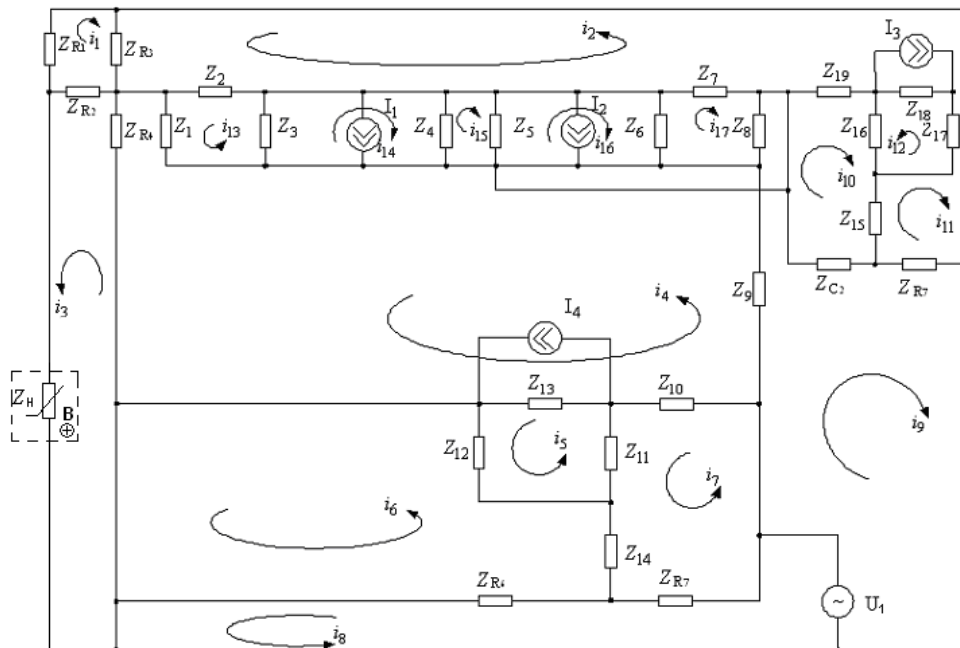


Рис. 3. Перетворена нелінійна еквівалентна схема мікроелектронного перетворювача магнітної індукції з частотним виходом

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від магнітної індукції. Це можна зробити, розв'язавши систему рівнянь Кірхгофа, яка складена для змінного струму на основі еквівалентної схеми (рис. 3). Розв'язання системи рівнянь (1) дозволяє отримати величину повного опору на електродах колектор-колектор перетворювача. Розкладаючи повний опір на дійсну і уявну складові, можна визначити еквівалентну ємність коливального контуру, яка залежить від магнітної індукції.

Система рівнянь Кірхгофа, згідно з напрямками контурних струмів, має вигляд

$$\left. \begin{aligned}
 0 &= (Z_{R_1} + Z_{R_2} + Z_{R_3}) i_1 - Z_{R_3} i_1 - Z_{R_2} i_3; \\
 0 &= (Z_{R_1} + Z_2 + Z_7 + Z_{19} + Z_{18}) i_2 - Z_{R_3} i_1 - Z_2 i_{13} + Z_7 i_{17} + Z_{19} i_{10} - Z_{18} (I_3 + i_{12}); \\
 0 &= (Z_{R_2} + Z_{R_4} + Z_H) i_3 - Z_{R_2} i_1 - Z_{R_4} i_4; \\
 0 &= (Z_{R_4} + Z_1 + Z_9 + Z_{10} + Z_{13}) i_4 - Z_{R_4} i_3 - Z_1 i_{13} - Z_9 i_7 - Z_{10} i_7 + Z_{13} (I_4 - i_{15}); \\
 0 &= (Z_{11} + Z_{12} + Z_{13}) i_5 - Z_{11} i_7 - Z_{13} (I_4 + i_4) - Z_{12} i_6; \\
 0 &= (Z_{R_7} + Z_{14} + Z_{12}) i_6 - Z_{R_7} i_8 - Z_{14} i_7 - Z_{14} i_7 - Z_{12} i_5; \\
 0 &= (Z_8 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{14} + Z_{R_6}) i_7 + Z_8 i_{17} - Z_9 i_4 - Z_{10} i_4 - Z_{11} i_5 - Z_{14} i_6 - Z_{R_6} i_8; \\
 \dot{U}_1 &= (Z_{R_7} + Z_{R_6}) i_8 - Z_{R_7} i_6 - Z_{R_6} i_7; \\
 \dot{U}_1 &= (Z_{C_2} + Z_{R_8}) i_9 + Z_{C_2} i_{10} + Z_{R_8} i_{11}; \\
 0 &= (Z_{C_2} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{19}) i_{10} + Z_{C_2} i_9 - Z_{15} i_{11} + Z_{16} i_{12} + Z_{19} i_2; \\
 0 &= (Z_{R_8} + Z_{15} + Z_{17}) i_{11} + Z_{R_8} i_9 - Z_{15} i_{10} + Z_{17} i_{10}; \\
 0 &= (Z_{16} + Z_{17} + Z_{18}) i_{12} + Z_{16} i_{10} + Z_{17} i_{11} + Z_{18} (I_3 - i_2); \\
 0 &= (Z_1 + Z_2 + Z_3) i_{13} - Z_1 i_4 + Z_3 (i_{14} + I_1) - Z_2 i_2 + Z_3 I_2 - Z_1 (I_2 + I_1) - Z_2 (I_1 + I_2); \\
 0 &= (Z_3 + Z_4) i_{14} + Z_3 i_{13} - Z_4 i_{15} + Z_3 (I_1 + I_2) - Z_4 (I_1 + I_2); \\
 0 &= (Z_4 + Z_5) i_{15} - Z_4 i_{14} - Z_5 i_{16} + Z_4 (I_1 + I_2) - Z_5 (I_1 + I_2); \\
 0 &= (Z_5 + Z_6) i_{16} - Z_5 i_{15} - Z_6 i_{17} + Z_5 (I_1 + I_2) - Z_6 (I_1 + I_2); \\
 0 &= (Z_6 + Z_7 + Z_8) i_{17} - Z_6 i_{16} + Z_7 i_2 + Z_8 i_7 + Z_6 (I_1 + I_2) - Z_7 (I_1 + I_2) - Z_8 (I_1 + I_2);
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{де } Z_1 = \frac{R_{GS1}}{1 + \omega^2 R_{GS1}^2 C_{GS1}^2} - j \frac{R_{GS1}^2 \omega C_{GS1}}{1 + \omega R_{GS1}^2 C_{GS1}^2}; \quad Z_2 = -\frac{j}{\omega C_{GD1}}; \quad Z_3 = R_{DS1}; \quad Z_4 = -\frac{j}{\omega C_{DS1}};$$

$$Z_5 = -\frac{j}{\omega C_{DS2}}; \quad Z_6 = R_{DS2}; \quad Z_7 = -\frac{j}{\omega C_{GD2}}; \quad Z_8 = \frac{R_{GS2}}{1 + \omega^2 R_{GS2}^2 C_{GS2}^2} - j \frac{R_{GS2}^2 \omega C_{GS2}}{1 + \omega R_{GS2}^2 C_{GS2}^2};$$

$$Z_9 = \frac{R_5}{1 + \omega^2 R_5^2 C_1^2} - j \frac{R_5^2 \omega C_1}{1 + \omega R_5^2 C_1^2}; \quad Z_{10} = \frac{R_{E1}}{1 + \omega^2 R_{E1}^2 C_{E1}^2} - j \frac{R_{E1}^2 \omega C_{E1}}{1 + \omega R_{E1}^2 C_{E1}^2}; \quad Z_{11} = R_{Bd1};$$

$$Z_{12} = -\frac{j}{\omega C_{k1}}; \quad Z_{13} = R_{k1}; \quad Z_{14} = R_{B1}; \quad Z_{15} = R_{B2}; \quad Z_{16} = R_{Bd2}; \quad Z_{17} = -\frac{j}{\omega C_{k2}}; \quad Z_{18} = R_{k2};$$

$$Z_{19} = \frac{R_{E2}}{1 + \omega^2 R_{E2}^2 C_{E2}^2} - j \frac{R_{E2}^2 \omega C_{E2}}{1 + \omega R_{E2}^2 C_{E2}^2}; \quad Z_{R1} = R_1; \quad Z_{R2} = R_2; \quad Z_{R3} = R_3; \quad Z_{R4} = R_4; \quad Z_{R6} = R_6;$$

$$Z_{R7} = R_7; \quad Z_{R8} = R_8; \quad Z_H = \frac{R_H}{1 + \omega^2 R_H^2 C_H^2} - j \frac{R_H^2 \omega C_H}{1 + \omega R_H^2 C_H^2}; \quad Z_{C2} = -\frac{j}{\omega C_2}.$$

Елементи еквівалентної схеми описуються такими величинами: R_G — омичний опір електрода затвора, R_{GS} — опір між електродами затвора і витоку, R_{DS} — опір стік-витік, R_D — опір p - n переходу стоку, R_S — опір p - n переходу витоку, R_n — опір підкладки, R_B — опір бази, R_C — опір колекторного переходу, R_E — опір емітерного переходу, $R_1, R_2, R_3, R_4, R_7, R_6$ — опори ділянки, I_{DS} — струм стік-витік, I_{BS} і I_{BD} — струм переходів підкладка-витік та підкладка-стік.

Струми I_{BS} і I_{BD} в лінійному режимі, якщо виконується умова $U_{ds} < (U_{gs} - U_T)$, визначаються згідно з виразами [5]

$$I_{bs} = I_{ss} (\exp U_{bs}/(NU_t) - 1); \quad (2)$$

$$I_{bd} = I_{ss} (\exp U_{bd}/(NU_t) - 1), \quad (3)$$

де I_{ss} — струм насичення p - n переходу підкладки; U_{bs} — напруга підкладка-витік; U_{bd} — напруга підкладка-стік; N — коефіцієнт неідеальності переходу підкладка-стік, U_t — температурний потенціал p - n переходу.

Статична вихідна характеристика МДН-транзистора в лінійному режимі описується виразом [5]

$$I_{ds} = \frac{\mu C_0 W}{L} \left((U_{gs} - U_T) U_{ds} - \frac{U_{ds}^2}{2} \right), \quad (4)$$

де L — довжина каналу; W — ширина каналу; μ — рухливість носіїв в каналі; C_0 — питома ємність оксиду; U_{gs} — напруга затвор-витік; U_{ds} — напруга стік-витік; U_T — порогова напруга.

Вираз для порогової напруги МДН-транзистора для аналітичних моделей має вигляд [5]

$$U_T = \Phi_{SiO_2} + 2\Phi_B - \frac{Q_S}{C_0} + \frac{1}{C_0} \sqrt{4\epsilon_S q N_A \Phi_B}, \quad (5)$$

де Q_S — питомий поверхневий заряд, Φ/m^2 ; ϵ_S — відносна електрична проникність напівпровідника; N_A — концентрація домішок.

Потенціал Фермі, що входить у вираз (5), описується таким чином:

$$\Phi_B = \pm kT/q \cdot \ln(N_A/n_i). \quad (6)$$

Струм стоку в режимі насичення у разі $U_{ds} \geq (U_{gs} - U)_T$ описується формулою [6]

$$I_{dsSAT} = \frac{\mu C_0 W}{6L} \left((U_{dsSAT} + 2\Phi_B)^2 + U_{gs} (U_{dsSAT} + 2\Phi_B) - 12\Phi_B \left(U_{gs} - \Phi_B - \frac{4}{3} K \Phi_B^{1/2} \right) \right), \quad (7)$$

де

$$U_{dsSAT} = U_{gs} - 2\Phi_B + K^2 \left(1 - \left(1 + 2U_{gs}/K^2 \right)^{1/2} \right); \quad (8)$$

$$K = (\epsilon_S q N_A / C_0)^{1/2}. \quad (9)$$

Опір стік-витік R_{ds} в лінійній області визначається виразом [7]

$$R_{ds} = \frac{L}{W \mu C_0} (U_{gs} - U_T), \quad (10)$$

а в області насичення

$$R_{ds} = \frac{12 \left[L (U_d - U_{dsSAT})^{1/2} - 2 (\epsilon_s / q N_A)^{1/2} (U_d - U_{dsSAT}) \right]}{W \mu C_0 (2 \epsilon_s / q N_A)^{1/2}} \times \frac{1}{(U_{dsSAT} + 2 \phi_B)^2 + U_{gs} (U_{dsSAT} + 2 \phi_B) - 12 \phi_B (U_{gs} - \phi_B - 4/3 K \phi_B^{1/2})}, \quad (11)$$

де U_d — напруга на стокові; U_{dsSAT} — напруга стік-витік в режимі насичення.

Для спрощення запису системи рівнянь Кірхгофа введемо такі позначення:

$$\begin{aligned} N_1 &= Z_{R_1} + Z_{R_2} + Z_{R_3}; & N_2 &= Z_{R_3} + Z_2 + Z_7 + Z_{19} + Z_{18}; & N_3 &= Z_{R_2} + Z_{R_4} + Z_H; \\ N_4 &= Z_{R_4} + Z_1 + Z_9 + Z_{10} + Z_{13}; & N_5 &= Z_{11} + Z_{12} + Z_{13}; & N_6 &= Z_{R_7} + Z_{14} + Z_{12}; \\ N_7 &= Z_8 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{14} + Z_{R_6}; & N_8 &= Z_{R_7} + Z_{R_6}; & N_9 &= Z_{C_2} + Z_{R_8}; \\ N_{10} &= Z_{C_2} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{19}; & N_{11} &= Z_{R_8} + Z_{15} + Z_{17}; & N_{12} &= Z_{16} + Z_{17} + Z_{18}; \\ N_{13} &= Z_1 + Z_2 + Z_3; & N_{14} &= Z_3 + Z_4; & N_{15} &= Z_4 + Z_5; \\ N_{16} &= Z_5 + Z_6; & N_{17} &= Z_6 + Z_7 + Z_8. \end{aligned}$$

Тоді система (1) набуває вигляду

$$\begin{cases} 0 = N_1 i_1 - Z_{R_3} i_1 - Z_{R_2} i_3; \\ 0 = N_2 i_2 - Z_{R_3} i_1 - Z_2 i_{13} + Z_7 i_{17} + Z_{19} i_{10} - Z_{18} (I_3 + i_{12}); \\ 0 = N_3 i_3 - Z_{R_2} i_1 - Z_{R_4} i_4; \\ 0 = N_4 i_4 - Z_{R_4} i_3 - Z_1 i_{13} - Z_9 i_7 - Z_{10} i_7 + Z_{13} (I_4 - i_{15}); \\ 0 = N_5 i_5 - Z_{11} i_7 - Z_{13} (I_4 + i_4) - Z_{12} i_6; \\ 0 = N_6 i_6 - Z_{R_7} i_8 - Z_{14} i_7 - Z_{14} i_7 - Z_{12} i_5; \\ 0 = N_7 i_7 + Z_8 i_{17} - Z_9 i_4 - Z_{10} i_4 - Z_{11} i_5 - Z_{14} i_6 - Z_{R_6} i_8; \\ \dot{U}_1 = N_8 i_8 - Z_{R_7} i_6 - Z_{R_6} i_7; \\ \dot{U}_1 = N_9 i_9 + Z_{C_2} i_{10} + Z_{R_8} i_{11}; \\ 0 = N_{10} i_{10} + Z_{C_2} i_9 - Z_{15} i_{11} + Z_{16} i_{12} + Z_{19} i_2; \\ 0 = N_{11} i_{11} + Z_{R_8} i_9 - Z_{15} i_{10} + Z_{17} i_{10}; \\ 0 = N_{12} i_{12} + Z_{16} i_{10} + Z_{17} i_{11} + Z_{18} (I_3 - i_2); \\ 0 = N_{13} i_{13} - Z_1 i_4 + Z_3 (i_{14} + I_1) - Z_2 i_2 + Z_3 I_2 - Z_1 (I_2 + I_1) - Z_2 (I_1 + I_2); \\ 0 = N_{14} i_{14} + Z_3 i_{13} - Z_4 i_{15} + (Z_3 - Z_4) (I_1 + I_2); \\ 0 = N_{15} i_{15} - Z_4 i_{14} - Z_5 i_{16} + (Z_4 - Z_5) (I_1 + I_2); \\ 0 = N_{16} i_{16} - Z_5 i_{15} - Z_6 i_{17} + (Z_5 - Z_6) (I_1 + I_2); \\ 0 = N_{17} i_{17} - Z_6 i_{16} + Z_7 i_2 + Z_8 i_7 + (Z_6 - Z_7 - Z_8) (I_1 + I_2). \end{cases} \quad (12)$$

Розв'язання системи рівнянь дало змогу отримати теоретичну залежність активної і реактивної складової повного опору, частоти генерацій від магнітної індукції, а також функцію чутливості. На рис. 4 подані теоретичні та експериментальні залежності активної та реактивної складових повного опору від магнітної індукції

На підставі схеми (див. рис. 3) відповідно до методу Ляпунова, визначена функція перетворення пристрою, що є залежністю частоти генерації від величини магнітної індукції. Аналітична залежність функції перетворення має вигляд

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(C_H^2(B)R_H^2(B) + R_H^2(B)C_H(B)C_{DS2} - L_{екв}C_{DS2}) + D}{2L_{екв}C_{DS2}C_H^2(B)R_H^2(B)}}, \quad (13)$$

$$\text{де } D = \sqrt{(C_H^2(B)R_H^2(B) + R_H^2(B)C_H(B)C_{DS2} - L_{екв}C_{DS2})^2 + 4L_{екв}C_{DS2}C_H^2(B)R_H^2(B)}.$$

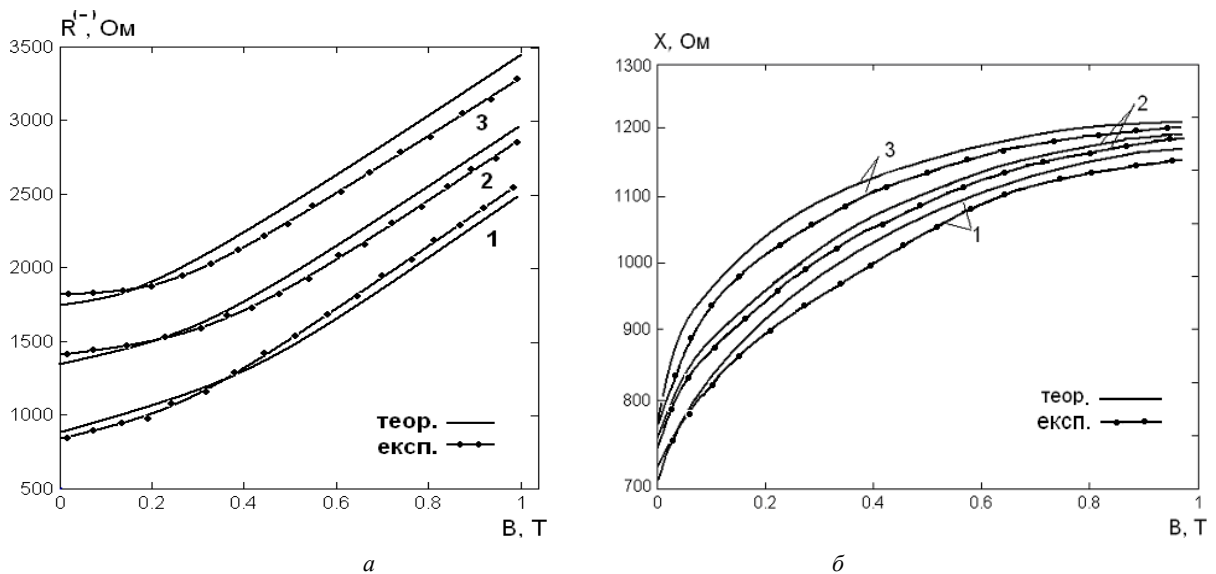


Рис. 4. Залежності: *a* — активної; *b* — реактивної складових повного опору від магнітної індукції: 1 — $S_{D,2}$; 2 — $S_{D,2}$; 3 — $S_{D,2}$.

Графічна залежність функції перетворення показана на рис. 5. Чутливість перетворювача визначається на підставі виразу (13) і описується рівнянням

$$S_B^F = \frac{1}{\sqrt{8}} \left[\left(2C_H(B)R_H^2(B) \left(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B} \right) + 2C_H^2(B)R_H(B) \left(\frac{\partial R_H(B)}{\partial B} \right) + 2R_H(B)C_H(B)C_{DS2} \times \right. \right. \\ \times \left(\frac{\partial R_H(B)}{\partial B} \right) + C_{DS2}R_H^2(B) \left(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B} \right) + \frac{1}{2} \left(2A_1 \left(2C_H(B)R_H^2(B) \left(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B} \right) + 2C_H^2(B)R_H(B) \times \right. \right. \\ \times \left. \left. \left(\frac{\partial R_H(B)}{\partial B} \right) + 2R_H(B)C_H(B)C_{DS2} \left(\frac{\partial R_H(B)}{\partial B} \right) + R_H^2(B) \left(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B} \right) C_{DS2} \right) + 8L_{екв}C_{DS2}C_H(B) \times \right. \\ \times \left. \left. \left. \left. R_H^2(B) \left(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B} \right) + 8A_2 \left(\frac{\partial R_H(B)}{\partial B} \right) \right) \right) \right] / \left[\left(\frac{\sqrt{A_1^2 + 4A_2}}{A_2 - 2\sqrt{A_1 + A_1^2 A_2 + A_1^2}} \right) \left(\frac{\partial C_H(B)}{\partial B} \right) \right] / \left[\left(A_2 - \right. \right. \\ \left. \left. - 2A_1 + A_1^2 + 4A_2 \right)^{1/2} \right] / L_{екв}C_{DS2}C_H^2(B)R_H^3(B) \left. \right] / \left[\left(\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4A_2}}{\sqrt{A_2}} \right) \right], \quad (14)$$

де $A_1 = C_H^2(B)R_H^2(B) + C_H(B)R_H^2(B)C_{DS2} - L_{ек6}C_{DS2}$; $A_2 = L_{ек6}C_{DS2}C_H^2(B)R_H(B)$.

Графік залежності чутливості від величини магнітної індукції з різними напругами живлення показаний на рис. 6. Як випливає з графіка, найбільша чутливість пристрою лежить у діапазоні від 0...200 мТ і складає 10...35 кГц/мТ.

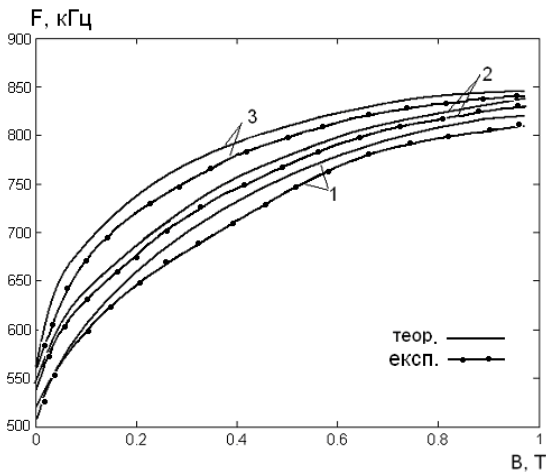


Рис. 5. Залежність частоти генерації радіовимірювального перетворювача з різними напругами живлення: 1 — 5 В; 2 — 5,5 В; 3 — 6 В

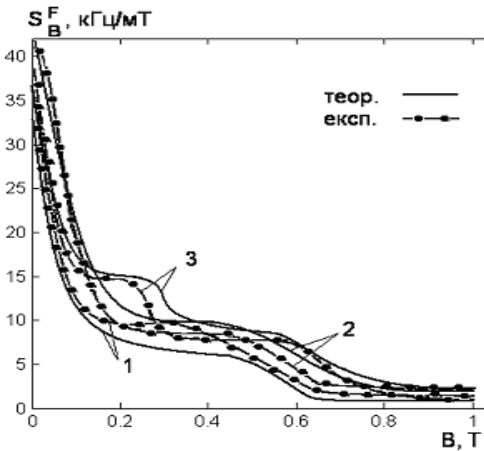


Рис. 6. Залежність чутливості від величини магнітної індукції з різними напругами живлення: 1 — 5 В; 2 — 5,5 В; 3 — 6 В

Висновки

Запропонована мікроелектронна схема перетворювача магнітної індукції у частотний сигнал з магніточутливим елементом Холла. Індуктивний елемент коливального контуру створений на основі біполярного транзистора з RC-колом, що дозволяє створити перетворювач повністю за інтегральною технологією. Розроблена математична модель перетворювача на основі рівнянь Кірхгофа. З математичної моделі отримані аналітичні вирази для функції перетворення і рівняння чутливості. Чутливість перетворювача складає 20...40 кГц/мТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кноринг, В. С. Гутников — Л. : Энергия, 1970. — 424 с.
2. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Олександр Володимирович Осадчук. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2000. — 303 с.
3. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 1999. — 275 с.
4. Пат. №78318 України, МКИ H01 L 29/82. Магнітний сенсор з активним індуктивним елементом / Осадчук В. С., Осадчук О. В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. Опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3.
5. Ферри Д. Електроника ультрабольших интегральных схем / Д. Ферри, Л. Эйкерс, Э. Гринич; пер. с англ. Е. З. Мазеля. — М. : Мир, 1991. — 327 с.
6. PSPICE User's guide. MicroSim Corporation. La Cadena Drive, Laguna Hills, 1989. — 450 p.
7. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств / Разевиг В. Д. — М. : Радио и связь, 1992. — 72 с.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 15.02.11
Рекомендована до друку 1.03.11

Осадчук Володимир Степанович — професор, **Мартинюк Володимир Валерійович** — доцент.

Кафедра електроніки;

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри радіотехніки;

Стовбчата Ольга Петрівна — студентка Інституту магістратури, аспірантури та докторантури.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця