

ОСАДЧУК Я. О.

<https://orcid.org/0000-0002-5472-0797>e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

ОСАДЧУК О. В.

<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

ОСАДЧУК В. С.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3142-3642>e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com

АВТОГЕНЕРАТОРНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЕЛЕМЕНТОМ ХОЛЛА І ДВОКОЛЕКТОРНИМ БІПОЛЯРНИМ МАГНІТОТРАНЗИСТОРОМ

Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори магнітного поля з частотним вихідним сигналом на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором з первинним магніточутливим елементом Холла і біполярним двоколекторним магніточутливим транзистором, причому первинні магніточутливі елементи виступають ще і як активні елементи схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів. У сенсорах магнітного поля з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у надвисоких частотах. На основі аналізу фізичних процесів у первинних магніточутливих елементах і автогенераторах розроблено математичні моделі сенсорів, на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Отримані функції наочно показують вплив кожного елемента первинних магнітних перетворювачів і елементів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з еквівалентних схем пристроїв на основі зв'язку рівнянь Кірхгофа. Показано, що основний внесок у функції перетворення вносить зміна магнітної індукції, яка викликає зміну від'ємного диференційного опору і еквівалентної ємності коливального контуру автогенератора, що у свою чергу, змінює вихідну частоту сенсорів магнітного поля.

Автогенераторні параметричні сенсори магнітного поля з частотним вихідним сигналом дозволяють значно підвищити точність і чутливість вимірювання магнітної індукції, відмовитись від аналого-цифрових перетворювачів і підсилювальних пристроїв при подальшій обробці інформаційних сигналів, вони також дозволяють передавати вихідну інформацію на відстань при роботі у надвисоких частотах. Чутливість сенсорів магнітного поля змінюється від 11,95 кГц/мТ до 1,45 кГц/мТ при зміні магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ.

Ключові слова: сенсор, магнітна індукція, частота, від'ємний диференційний опір, автогенератор, елемент Холла, біполярний двоколекторний магніточутливий транзистор.

JAROSLAV OSADCHUK, ALEXANDER OSADCHUK, VLADIMIR OSADCHUK
Vinnytsia National Technical University

AUTOGENERATOR PARAMETRIC SENSORS OF THE MAGNETIC FIELD WITH A HALL ELEMENT AND A TWO-COLLECTOR BIPOLAR MAGNETOTRANSISTOR

Self-oscillating parametric magnetic field sensors with a frequency output signal based on transistor structures with negative differential resistance with primary magnetically sensitive Hall elements and a bipolar two-collector magnetically sensitive transistor are proposed, moreover, the primary magnetically sensitive elements also act as active circuit elements. Magnetic field sensors with a frequency output do not require analog-to-digital converters and amplifying devices for further processing of information signals, which reduces the cost of information-measuring equipment, in addition, it is possible to transmit information over a distance when the sensors operate at microwave frequencies. Based on the analysis of physical processes in primary magnetically sensitive elements and self-oscillators, mathematical models of sensors were developed, on the basis of which parametric dependences of the conversion and sensitivity functions were obtained. The obtained functions clearly show the influence of each element of the primary magnetic converters and self-oscillator elements on the output frequency of the sensors in comparison with the calculations of the conversion functions from equivalent device circuits based on the Kirchhoff solution equations. It is shown that the main contribution to the conversion functions is made by a change in the magnetic induction, which causes a change in the negative differential resistance and the equivalent capacitance of the oscillatory circuit of the self-oscillator, which in turn changes the output frequency of the magnetic field sensors. Self-oscillating parametric magnetic field sensors with a frequency output signal can significantly improve the accuracy and sensitivity of measuring magnetic induction, abandon analog-to-digital converters and amplifying devices in the further processing of information signals, they also allow transmitting initial information over a distance when operating at microwave frequencies. The sensitivity of the magnetic field sensors varies from 1.45 kHz/mT to 11.95 kHz/mT when the magnetic induction changes from 0.1 to 120 mT.

Keywords: sensor, magnetic induction, frequency, negative differential resistance, autogenerator, Hall element, bipolar two-collector magnetically sensitive transistor.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Магнітні вимірювання знаходять практичне застосування при дослідженні властивостей матеріалів, у випробуваннях магнітних деталей і елементів, у магнітній дефектоскопії, при вивченні магнітних полів Землі, при вимірюванні і контролі магнітних полів в установках ядерної фізики та інше [1, 2, 3, 4–8].

Основними величинами, що характеризують магнітне поле, є магнітний потік, магнітна індукція і напруженість магнітного поля. Вимірювані магнітні величини звичайно попередньо перетворюються в електричні, більш зручні для вимірювання. Перетворювачі магнітних величин в електричні будуються на основі явищ електромагнітної індукції, ядерного магнітного резонансу, гальваномагнітних і деяких інших [9, 10].

На даний час в усіх галузях вимірювальної техніки (окрім телеметрії) використовуються виключно такі структури, в яких вихідною величиною є величина струму або напруги. Це приводить 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.

Усунути вищеперераховані недоліки можливо на основі параметричних сенсорів магнітного поля з частотним вихідним сигналом, які працюють в режимі перетворення «магнітна індукція-частота», що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [11, 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перспективним науковим напрямком у створенні сенсорів магнітного поля є дослідження в області сенсорів на основі напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором, що дозволяє створювати прилади з частотним вихідним сигналом. Магнітні сенсори з частотним виходом поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і завадостійкістю, що характеризують сенсори з кодовим виходом. Подальше перетворення частотно-модульованого сигналу знаходиться в основному до підрахунку періодів сигналу у продовж певного часу. Застосування принципу перетворення «магнітна індукція-частота» на основі мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором суттєво знижує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масогабаритні показники сенсорів магнітного поля, підвищити точність і чутливість перетворення інформаційного сигналу, тобто індукцію магнітного поля у частоту [13–20].

Постановка завдання

Метою роботи є створення та дослідження сенсорів магнітного поля на основі мікроелектронних транзисторних структур, в яких елемент Холла і біполярний двоколекторний магніточутливий транзистор виступають як первинні перетворювачі магнітного поля, так і як активні елементи автогенератора, в якому втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією від'ємного диференціального опору. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати застосування мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором для побудови магнітних сенсорів;
- 2) розробити математичні моделі сенсорів магнітного поля, в яких враховано залежність параметрів магніточутливих елементів від дії магнітної індукції та її вплив на вихідну частоту сенсора;
- 3) отримати параметричну залежність вихідної частоти сенсора від індукції магнітного поля;
- 4) зробити висновки з проведених досліджень.

Математична модель сенсорів магнітного поля

Сенсор магнітного поля з частотним вихідним сигналом будується на основі мікроелектронної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якій магніточутливим елементом є елемент Холла. Автогенераторний пристрій складається з біполярного VT1 і VT2 транзисторів, опорів R_1 - R_4 , ємності C_1 . Коливальний контур пристрою утворений на основі еквівалентної ємності повного опору на електродах стоку польового двозатворного транзистора VT2 і колектора біполярного транзистора VT1 та пасивної індуктивності L_1 . (рис. 1).

На елемент Холла діє магнітне поле, що приводить до зміни як еквівалентної ємності коливального контуру, так і від'ємного диференціального опору на виході пристрою, що викликає зміну резонансної частоти автогенератора сенсора. Втрати енергії в коливальному контурі компенсуються за рахунок енергії від'ємного диференціального опору [13]. Опори (R_1 - R_4) здійснюють живлення сенсора за допомогою джерела постійної $U_{жс}$. Ємність C_1 запобігає проходженню змінного струму через джерело напруги. Вольт-амперна характеристика пристрою має спадну ділянку, що відповідає існуванню від'ємного диференціального опору на цій ділянці. Перейдемо до розрахунку зміни параметрів напруги Холла при дії магнітного поля. Згідно з класичним представленням ефекту Холла, холлівська різниця потенціалів описується формулою [21]

$$U_x = R_H \frac{IB}{d}, \quad (1)$$

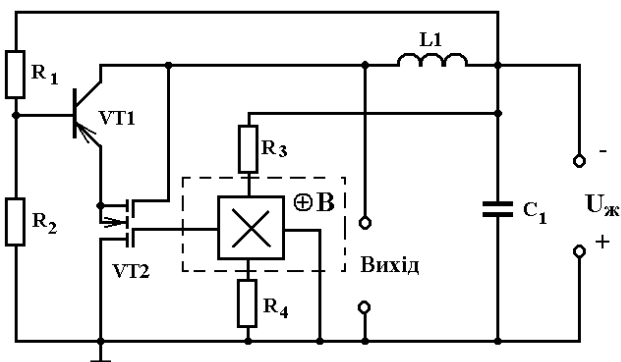


Рис. 1. Електрична схема сенсора магнітного поля з частотним виходом

де $R_H = A[qn]^{-1}$ – постійна Холла, A – величина, яка залежить від механізму розподілу носіїв заряду, а також від характеру розсіювання носіїв заряду за швидкостями, I – струм, який протікає через напівпровідникову пластину уздовж неї, d – товщина напівпровідникової пластини, B – індукція магнітного поля, в якому розташована напівпровідникова пластинка, q – заряд електрона, n – концентрація електронів у пластині.

Зміна напруги Холла при дії магнітного поля описується виразами

$$\Delta U_x(B) = \frac{\partial U_x}{\partial A} \Delta A(B) + \frac{\partial U_x}{\partial n} \Delta n(B) + \frac{\partial U_x}{\partial I} \Delta I(B) + \frac{\partial U_x}{\partial B} \Delta B . \quad (2)$$

Після диференціювання вираз (2) приймає вигляд

$$\Delta U_x(B) = \frac{IB}{qnd} \Delta A(B) + \frac{AIB}{qn^2d} \Delta n(B) + \frac{AB}{qnd} \Delta I(B) + \frac{AI}{qnd} \Delta B . \quad (3)$$

Знаючи залежність зміни напруги Холла від зміни її параметрів при дії магнітного поля, перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти сенсора при дії магнітного поля. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії магнітного поля в енергію електричного змінного поля на виході сенсора. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії сенсора. На першому етапі роботи сенсора енергія магнітного поля перетворюється в енергію електричного поля через холлівську напругу, яка є вхідною напругою для автогенератора сенсора. В наступному енергія електричного поля, яка визначається холлівською напругою, перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю $C_{екв}$ коливального контуру автогенератора сенсора. Таким чином, коефіцієнт корисної дії сенсора магнітного поля визначається формулою

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2tAU_x I_x} = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2 dqn}{2 \cdot t \cdot I_x \cdot I \cdot B} , \quad (4)$$

де I_x – струм, який створює холлівська напруга в опорі кола автогенератора, t – період зміни вихідної напруги U_{\sim} без дії магнітного поля, U_{\sim} – зміна вихідна напруга пристрою, оскільки коефіцієнт A близький до одиниці, тому в подальшому він не враховується. З виразу (4) визначимо еквівалентну ємність коливального контуру автогенератора

$$C_{екв} = \frac{2t\eta I \cdot I_x B}{U_{\sim}^2 dqn} . \quad (5)$$

З другого боку, еквівалентну ємність $C_{екв}$ можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [22]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{екв}} \sqrt{\frac{R_g^2 C_{екв}}{L} - 1} , \quad (6)$$

де R_g – від'ємний диференційний опір в коливальному контурі, L – індуктивність коливального контуру.

З виразу (6) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначаємо $C_{екв}$

$$\left(F_0^2 4\pi^2 R_g^2 L \right) C_{екв}^2 - R_g^2 C_{екв} + L = 0 . \quad (7)$$

Введемо наступні позначення

$$a_1 = F_0^2 4\pi^2 R_g^2 L , \quad (8)$$

$$a_2 = R_g^2 , \quad (9)$$

$$a_3 = L , \quad (10)$$

$$a_4 = C_{екв} = \frac{2t\eta I \cdot I_x B}{U_{\sim}^2 dqn} . \quad (11)$$

Розв'язавши квадратне рівняння (7) і використавши вираз (5), а також позначення (8)–(11), отримаємо вираз для визначення резонансної частоти від параметрів елемента Холла і параметрів автогенератора

$$a_1 = \left[\frac{a_2}{a_4} - \frac{a_3}{a_4^2} \right] . \quad (12)$$

Підставивши значення a_1, a_2, a_3, a_4 у вираз (12), отримаємо кінцеву параметричну залежність вихідної частоти сенсора магнітного поля від дії магнітної індукції на елемент Холла

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{dqnu_{\sim}^2}{2\eta t I \cdot I_x B L} - \frac{U_{\sim}^4 d^2 (qn)^2}{4t^2 \eta^2 R_g^2 (I \cdot I_x)^2 B^2} \right]^{1/2} . \quad (13)$$

Отримана формула (13) дозволяє простим шляхом розрахувати функцію перетворення сенсора, ніж класичним складним шляхом із еквівалентної схеми сенсора на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа, які можна вирішити на комп'ютері чисельним шляхом. На рис. 2 надано графічну залежність розрахункової і експериментальної кривих функції перетворення сенсора

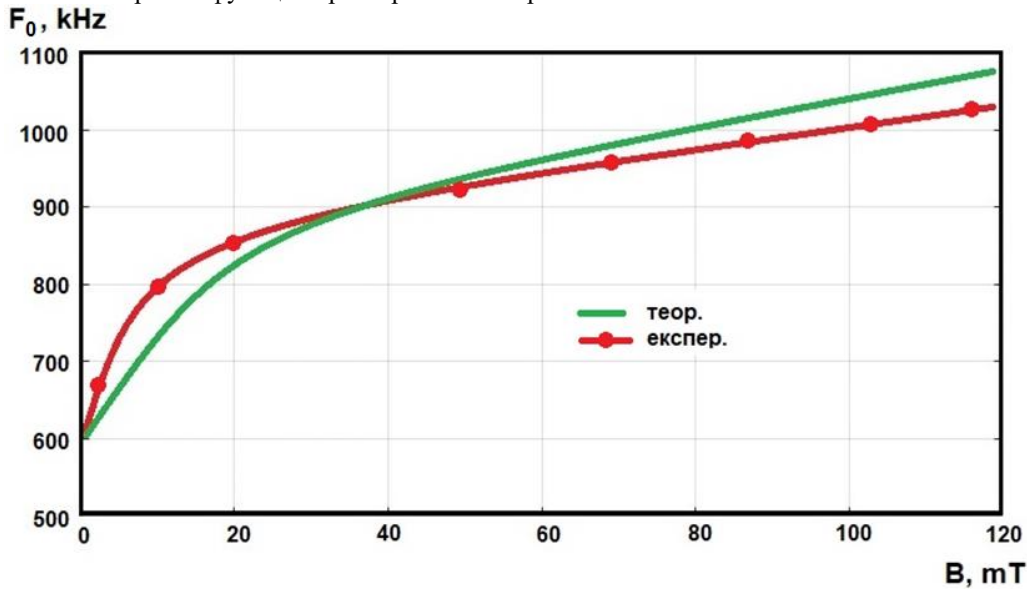


Рис. 2. Залежність функції перетворення сенсора від магнітної індукції

Чутливість сенсора визначається похідною функції (13) за параметром індукції B . Якщо врахувати також залежність вихідної змінної напруги сенсора від магнітної індукції, а останні параметри вважати незалежними від індукції, то вираз (13) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} [b_1 B^{-1} U_{\sim}^2(B) - b_2 B^{-2} U_{\sim}^4(B)]^{1/2}, \quad (14)$$

де $b_1 = \frac{dq_n}{2\eta I \cdot I_x L}$, $b_2 = \frac{d^2(qn)^2}{4\eta^2 t^2 R_g^2 (I \cdot I_x)^2}$, то тоді функція чутливості S_{F_0} описується рівнянням

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} [b_1 B^{-1} U_{\sim}^2(B) - b_2 B^{-2} U_{\sim}^4(B)]^{-1/2} \left[\left(2b_1 U_{\sim}(B) B^{-1} \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - U_{\sim}^2(B) b_1 B^{-2} \right) + \left(2b_2 B^{-3} U_{\sim}^4(B) - 4b_2 U_{\sim}^3(B) B^{-2} \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} \right) \right]. \quad (15)$$

Графік чутливості сенсора від магнітної індукції подано на рис. 3.

Як видно з графіка (рис. 3), чутливість у діапазоні від 0,1 мТл до 120 мТл складає (1,45 – 11,95) кГц/мТ.

Подальше мікроелектронне виконання сенсорів магнітного поля можливе на основі схеми автогенераторного параметричного пристрою з використанням магніточутливого двоколекторного біполярного транзистора (ДМТ) [21, 23, 24]. Електрична схема сенсора магнітного поля подана на рис. 4. Для використання мікроелектронної технології при виготовленні сенсора запропоновано використати активний індуктивний елемент на основі біполярного транзистора з фазозсуваючим колом C1R11.

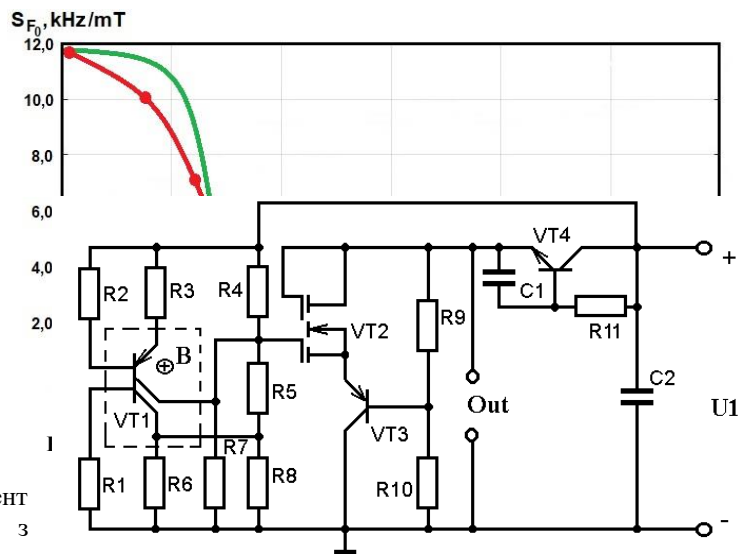


Рис. 4. Електрична схема сенсора магнітного поля з частотним виходом

Сенсор являє собою інтегральну схему, яка складається з двоколекторного магніточутливого транзистора VT1, польового двозатворного транзистора VT2, біполярного транзистора VT3. Активний індуктивний елемент коливального контуру автогенератора сенсора реалізовано на біполярному транзисторі VT4 з фазозсуваючим колом C1R11. Частота генерації автогенератора залежить від індукції магнітного поля.

На електродах колектора біполярного транзистора VT3 і стоку польового двозатворного транзистора VT2 існує повний опір, активна складова якого має від’ємне значення, а реактивна – смісний характер. Підключення активної індуктивності до стоку двозатворного транзистора VT2 і загальної шини через блокуючу ємність C2 створює коливальний контур, втрачає енергію в якому компенсуються енергією від’ємного диференційного опору. Резистори R1– R11 забезпечують режим живлення з постійного струму досліджуваної схеми. При дії магнітного поля на транзистор VT1 відбувається зміна еквівалентної ємності коливального контуру і від’ємного диференційного опору, що викликає зміну резонансної частоти пристрою.

Розглянемо принцип роботи двоколекторного біполярного магніточутливого транзистора і його вплив на вихідну частоту сенсора через зміну його параметрів від дії магнітного поля. ДМТ – це звичайний біполярний p-n-p транзистор, колектор в якому поділений на дві частини. Його принцип дії такий. При ввімкненні ДМТ за схемою зі спільним емітером і резисторами навантаження в колах колекторів (мостова схема), коли відсутнє магнітне поле, інжектвані емітером носії заряду (дірки) приблизно порівну розподіляються між колекторами. Струми обох колекторів будуть однаковими і різниця потенціалів між ними буде дорівнювати нулю. У поперековому магнітному полі (B⁺) відбувається перерозподіл інжектваних зарядів між колекторами, при цьому струм колектора K2 збільшується, а струм колектора K1 зменшується, що спричиняє розбалансування мостової схеми. Це приводить до зміни напруги між колекторами. При цьому із зростанням магнітного поля напруга збільшується. Коли змінюється напрям магнітного поля (B⁻), струм колектора K2 зменшується, а струм колектора K1 збільшується і, відповідно, змінюється знак напруги U між колекторами [21].

Поряд з вказаним перерозподілом інжектваних носіїв заряду між колекторами відбувається також зміна ефективної товщини бази. Цей ефект протилежний ефекту перерозподілу носіїв заряду, що приводить до зменшення магніточутливості ДМТ. Цей недолік усувають у ДМТ з вертикальними колекторами [21], у яких омичний контакт до бази і емітера розташовані по різні боки від колекторів, що дозволяє додатково підвищити магніточутливість двоколекторних магніточутливих транзисторів.

Як показано в роботі [21], вихідна напруга двоколекторного магніточутливого транзистора VT1 описується виразом

$$U = R_0 I_E \left[\frac{q^2 B E}{16(kT)^2 b \tau} \right] \cdot [a^4 - (a-b)^4] , \quad (16)$$

де R_0 – опір навантаження VT1, I_E – струм емітера VT1, q – заряд електрона, B – магнітна індукція, яка діє на VT1, E – напруженість електричного поля у базі VT1, τ – час життя носіїв заряду в базі VT1, b – 0,5 довжини емітерного омичного контакту VT1, a – 0,5 довжини базового омичного контакту VT1, k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура. На основі формули (16) визначимо зміну вихідної напруги магніточутливого транзистора VT1 при дії зовнішнього магнітного поля, отже

$$\Delta U(B) = \frac{\partial U}{\partial E} \Delta E(B) + \frac{\partial U}{\partial T} \Delta T(B) + \frac{\partial U}{\partial \tau} \Delta \tau(B) , \quad (17)$$

оскільки геометричні параметри VT1, заряд електрона, постійна Больцмана, опір навантаження VT1 і струм емітера не змінюється від дії магнітного поля. Після необхідних перетворень виразу (17), він приймає вигляд

$$\Delta U(B) = \frac{R_0 I_E q^2 B}{8 \tau k^2 T^2 b} [a^4 - (a-b)^4] \cdot \left[\frac{1}{2} \Delta E(B) - \frac{E}{T} \Delta T(B) - \frac{E}{2 \tau} \Delta \tau(B) \right] . \quad (18)$$

Перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти приладу від дії магнітного поля. Ця залежність визначається аналогічним чином як і для сенсора магнітного поля з елементом Холла, що розглянута вище. Вхідна потужність для автогенератора сенсора визначається на основі виразу (16) і описується рівнянням

$$P_{\text{вх}} = R_0 I_E^2 B^2 d_1^2 , \quad (19)$$

де d_1 дорівнює

$$d_1 = \frac{q^2 E [a^4 - (a-b)^4]}{16(kT)^2 b \tau} . \quad (20)$$

Вихідна потужність сенсора визначається формулою

$$P_{\text{вих}} = \frac{C_{\text{екв}} U^2}{2t} . \quad (21)$$

Виходячи з формул (19) – (21), коефіцієнт корисної дії сенсора дорівнює

$$\eta = \frac{C_{\text{екв}} U^2}{2t R_0 I_E^2 B^2 d_1^2} . \quad (22)$$

З виразу (22) визначаємо величину $C_{\text{екв}}$, яка має вигляд

$$C_{екв} = \frac{2\eta t R_0 I_E^2 B^2 d_1^2}{U_{\sim}^2} . \tag{23}$$

З другого боку, еквівалентна ємність коливального контуру генератора $C_{екв}$ зв'язана з резонансною частотою приладу виразом (6).

Підставивши у формулу (6) вираз (23), отримаємо параметричну залежність резонансної частоти від параметрів магніточутливого транзистора VT1 і параметрів автогенератора. Ця залежність описується рівнянням

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2(B)}{2\eta t R_0 I_E^2 B^2 L d_1^2} - \frac{U_{\sim}^4(B)}{4\eta^2 t^2 R_0^2 I_E^4 B^4 d_1^4 R_g^2} \right]^{1/2} . \tag{24}$$

Вираз (24) є функцією перетворення сенсора магнітного поля. На рис. 5 подана розрахункова залежність функції перетворення, згідно формули (24), і експериментальна залежність від дії магнітної індукції на сенсор.

Як видно з графіка (рис. 5), відносна похибка між розрахунками і експериментом складає 6% при вимірюванні магнітної індукції величиною 60 мТ.

Функція чутливості сенсора визначається на основі виразу (24), при цьому враховано, що вихідна змінна напруга сенсора також залежить від дії магнітної індукції, таким чином, функція чутливості описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(B) B^{-2} d_2 - U_{\sim}^4(B) B^{-4} d_3 \right]^{-1/2} \left(2U_{\sim}(B) B^{-2} \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} d_2 - 2U_{\sim}^2(B) B^{-3} d_2 \right) - \left(4U_{\sim}^3(B) B^{-4} d_3 \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 4U_{\sim}^4(B) B^{-5} d_3 \right), \tag{25}$$

де

$$d_2 = \frac{1}{2\eta t R_0 I_E^2 L d_1^2} , \tag{26}$$

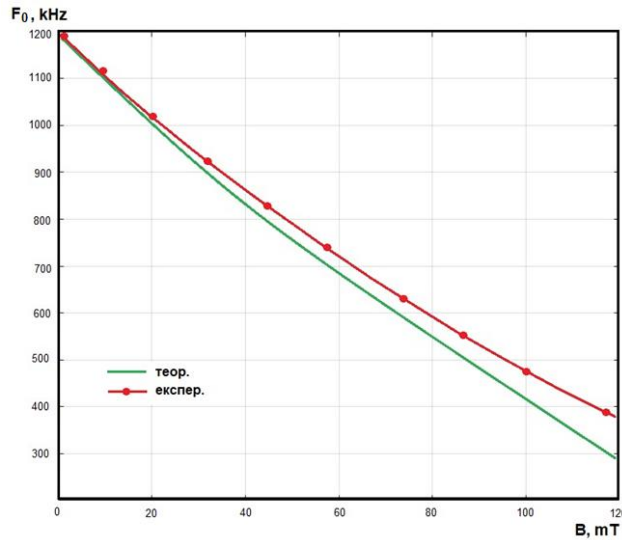


Рис. 5. Залежність функції перетворення сенсора від магнітної індукції

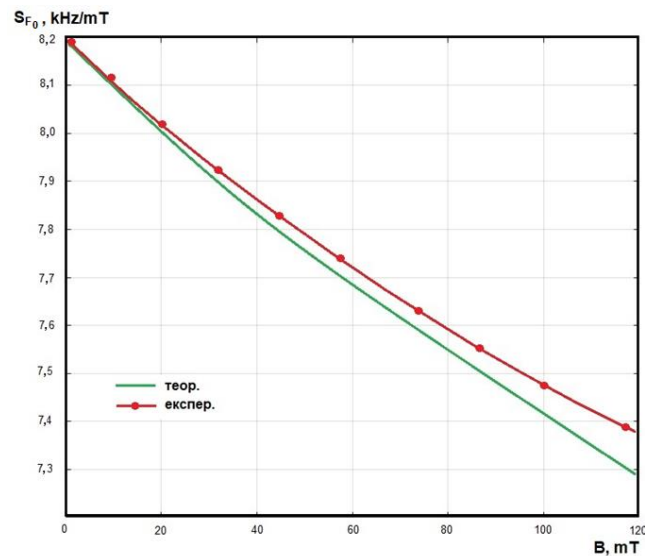


Рис. 6. Залежність функції чутливості сенсора від магнітної індукції

$$d_3 = \frac{1}{4\eta^2 t^2 R_0^2 I_E^4 d_1^4 R_g^2} \cdot \quad (27)$$

а величина d_1 визначається формулою (20).

На рис. 6 надано розрахункову і експериментальну залежності функції чутливості від дії магнітної індукції на сенсор

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість складає від 8,20 кГц/мТ до 7,29 кГц/мТ в діапазоні вимірювань магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори магнітного поля з частотним виходом на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними магніточутливими елементами Холла і біполярним двоколекторним магніточутливим транзистором, причому первинні магніточутливі елементи є активними елементами схеми автогенератора, що спрощує конструкцію сенсорів.

2. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних магніточутливих елементах і автогенераторах сенсорів, розроблено математичні моделі сенсорів магнітного поля, на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у функцію перетворення вносить зміна магнітної індукції. Це викликає зміну еквівалентної ємності і диференційного від'ємного опору автогенераторів сенсорів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту сенсорів магнітного поля. Чутливість сенсорів магнітного поля змінюється від 1,45 кГц/мТ до 11,95 кГц/мТ при зміні магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ.

3. Отримані параметричні залежності функцій перетворення сенсорів магнітного поля дозволяють набагато простіше отримувати основні характеристики сенсорів і наочно показують вплив кожного елемента первинних магнітних перетворювачів і елементів автогенератора на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з еквівалентних схем пристроїв на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа. У сенсорах магнітного поля з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у надвисоких частотах.

Література

1. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич [та ін.] ; за ред. Я. І. Лепіха, В. О. Романова. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – Москва : Техносфера, 2005. – 592 с.
3. Невлюдов І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева. – Київ : НАУ, 2018. – 200 с.
4. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
5. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / під ред. З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-пресс, 2002. Т. 2. – 475 с.

6. Dorothee Grieshaber, Robert MacKenzie, Janos V. and Erik Reimhult Electrochemical Biosensors. Sensor Principles and Architectures. Sensors 2008, 8, P. 1400–1458.
7. Chi-Han Wu, Po-Jen Shih, Yao-Chuan Tsai and Ching-Liang Dai Manufacturing and Characterization of Three-Axis Magnetic Sensors Using the Standard 180 nm CMOS Technology. Sensors 2021, 21, 6953. <https://doi.org/10.3390/s21216953>
8. George Manea, Sorin Popa Integration of sensor networks in cloud Computing. U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 78, Iss. 2, 2016.
9. Ambika Nagaraj. Introduction to Sensors in IoT and Cloud Computing Applications. Bangalore, India. 2021. 520 p.
10. Assaf T. A Frequency Modulation-Based Taxel Array: A Bio-Inspired Architecture for Large-Scale Artificial Skin. Sensors 2021, 21, 5112. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21155112>
11. Neto M., Ribeiro P., Nunes R., Jamone L., Bernardino A., Cardoso S. A Soft Tactile Sensor Based on Magnetics and Hybrid Flexible-Rigid Electronics. Sensors 2021, 21, 5098. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/s21155098>
12. Осадчук В.С. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом / Осадчук В.С., Осадчук О.В. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 264 с.
13. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3: [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. P. 212–237.
14. Осадчук В.С. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем / Осадчук В.С., Осадчук А.В. – Винница : Универсум-Винница, 1999. 275 с.
15. Vladimir S. Osadchuk, Oleksandr V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Tomasz Zyska, Aizhan Zhanpeisova Microelectronic frequency transducers of magnetic field with Hall elements. Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments 2018, 108086P, 2018, P. 1–14. <https://doi.org/10.1117/12.2501629>.
16. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Research on a magnetic field sensor with a frequency output signal based on a tunnel-resonance diode. Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska. IAPGOS, 4/2020, P. 51–56.
17. Осадчук О.В. Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода / О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 4 (287). – С. 160–167.
18. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
19. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Kisała P., Zyska T., Annabaev A., Mussabekov K. Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. Przegląd Elektrotechniczny. 2017, R93(3), P. 113–116.
20. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017).
21. Xiaofeng Zhao, Chenchen Jin, Qi Deng, Meiwei Lv and Dianzhong Wen Fabrication Technology and Characteristics Research of a Monolithically-Integrated 2D Magnetic Field Sensor Based on Silicon Magnetic Sensitive Transistors. Sensors 2018, 18, 2551; doi:10.3390/s18082551
22. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / Викулин И.М., Стафеев В.И. – Москва : Радио и связь, 1990. – 264 с.
23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S. Frequency Transducers of Gas Concentration Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Sidorenko A., Hahn H. (eds) Functional Nanostructures and Sensors for CBRN Defence and Environmental Safety and Security. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. 2020, P. 161-184. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1909-2_12
24. Викулин И.М. Двухколлекторные магнитотранзисторы / И. М. Викулин, М. А. Глауберман, Г. А. Егизарян и др. // ПиСУ. – 1981. – № 10. – С. 34–35.
25. Xiaofeng Zhao, Baozeng Li and Dianzhong Wen Fabrication Technology and Characteristics of a Magnetic Sensitive Transistor with nc-Si:H/c-Si Heterojunction. Sensors 2017, 17, 212; doi:10.3390/s17010212

References

1. Ya. I. Lepikh, Yu. O. Gordienko, S.V. Dzyadevich [etc.] Intelligent measuring systems based on microelectronic sensors of the new generation; for ed. J.I. Lepikha, V.O. Romanov. Odesa: Astroprint, 2011. 352 p.
2. Frieden J. modern sensors. Directory. Moscow: Technosphere, 2005. 592 p.
3. Nevlyudov I.S., Tokarev O.V. Automatic control of technological objects. Kyiv: NAU, 2018. 200 p.
4. Sensors: Reference Manual. Ed. ed. V.M. Sharapova, E.S. Polishchuk. Moscow: Technosfera, 2012. 624p.
5. Microelectronic sensors of physical quantities. Ed. Z. Yu. Gotri. Lviv: Liga-press, Vol.2, 2002. 475 p.
6. Dorothee Grieshaber, Robert MacKenzie, Janos V. and Erik Reimhult Electrochemical Biosensors. Sensor Principles and

Architectures. *Sensors* 2008, 8, P. 1400–1458.

7. Chi-Han Wu, Po-Jen Shih, Yao-Chuan Tsai and Ching-Liang Dai Manufacturing and Characterization of Three-Axis Magnetic Sensors Using the Standard 180 nm CMOS Technology. *Sensors* 2021, 21, 6953. <https://doi.org/10.3390/s21216953>
8. George Manea, Sorin Popa Integration of sensor networks in cloud Computing. *U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 78, Iss. 2, 2016.*
9. Ambika Nagaraj. Introduction to Sensors in IoT and Cloud Computing Applications. Bangalore, India. 2021. 520 p.
10. Assaf T. A Frequency Modulation-Based Taxel Array: A Bio-Inspired Architecture for Large-Scale Artificial Skin. *Sensors* 2021, 21, 5112. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21155112>
11. Neto M., Ribeiro P., Nunes R., Jamone L., Bernardino A., Cardoso S. A Soft Tactile Sensor Based on Magnetics and Hybrid Flexible-Rigid Electronics. *Sensors* 2021, 21, 5098. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/s21155098>
12. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V. Microelectronic magnetic field sensors with frequency output. Vinnytsia: VNTU, 2013. 264 p.
13. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3: [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20–22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. P. 212–237.
14. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 1999. 275 p.
15. Vladimir S. Osadchuk, Oleksandr V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Tomasz Zyska, Aizhan Zhanpeisova Microelectronic frequency transducers of magnetic field with Hall elements. Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments 2018, 108086P, 2018, P. 1–14. <https://doi.org/10.1117/12.2501629>.
16. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Research on a magnetic field sensor with a frequency output signal based on a tunnel-resonance diode. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska. IAPGOS*, 4/2020, P. 51–56.
17. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. Investigation of reactive properties of tunnel-resonance diode. *Herald of Khmelnytskyi National University*, № 4 (287), 2020. P. 160-167.
18. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
19. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Kisała P., Zyska T., Annabaev A., Mussabekov K. Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017, R93(3), P. 113–116.
20. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017).
21. Xiaofeng Zhao, Chenchen Jin, Qi Deng, Meiwei Lv and Dianzhong Wen Fabrication Technology and Characteristics Research of a Monolithically-Integrated 2D Magnetic Field Sensor Based on Silicon Magnetic Sensitive Transistors. *Sensors* 2018, 18, 2551; doi:10.3390/s18082551
22. Vikulin I.M., Stafeev V.I. Physics of semiconductor devices. Moscow: Radio and communication, 1990. 264 p.
23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S. Frequency Transducers of Gas Concentration Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Sidorenko A., Hahn H. (eds) *Functional Nanostructures and Sensors for CBRN Defence and Environmental Safety and Security*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. 2020, P. 161-184. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1909-2_12
24. Vikulin I.M., M. A. Glauberman, G. A. Egiazyryan et al. Two-collector magnetotransistors. *PiSU*. 1981. No. 10. P. 34–35.
25. Xiaofeng Zhao, Baozeng Li and Dianzhong Wen Fabrication Technology and Characteristics of a Magnetic Sensitive Transistor with nc-Si:H/c-Si Heterojunction. *Sensors* 2017, 17, 212; doi:10.3390/s17010212