

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/36>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

Осадчук В.С.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З МАГНІТОРЕЗИСТОРОМ І МАГНІТОДІОДОМ

Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних магніточутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі перетворювачів магнітного поля, на основі яких отримано аналітичні параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у функцію перетворення вносить зміна магнітної індукції. Це викликає зміну еквівалентної ємності і диференційного опору коливальної системи в автогенераторних пристроях, що у свою чергу, змінює вихідну частоту перетворювачів магнітного поля.

Отримані аналітичні вирази параметричних функцій перетворення і чутливості пристроїв наочно показують вплив кожного параметра первинних магнітних елементів і елементів автогенераторів на вихідну частоту перетворювачів у порівнянні з функціями перетворення і чутливості, отриманих з еквівалентних схем магнітних перетворювачів на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа.

Запропоновано автогенераторні параметричні перетворювачі магнітного поля на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними магніточутливими резистором і діодом, при чому первинні магніточутливі елементи є активними елементами схеми автогенератора, що спрощує конструкцію перетворювачів. Запропоновано також замінити пасивну індуктивність коливального контуру автогенератора на активну індуктивний елемент на основі транзистора з фазозсуваючим RC-колом, що дає можливість розширити діапазон регулювання вихідної частоти, а також повністю виготовляти перетворювачі магнітного поля за мікроелектронною технологією. У пристроях вимірювання магнітного поля з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, при цьому можливо передавати сигнал на відстань при роботі перетворювачів у надвисоких частотах. Чутливість пристроїв змінюється від 1,0 кГц/мТ до 4,95 кГц/мТ при зміні магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ на частотах від 500 кГц до 1500 кГц.

Ключові слова: перетворювач, магнітна індукція, від'ємний диференціальний опір, автогенератор, магніторезистор, магнітодіод.

Постановка роботи.

Вимірювання характеристик магнітних полів та їх вплив на технологічні процеси в таких галузях виробництва як металургія, енергетика, машинобудування, авіаційна та космічна техніка потребують створення вимірювальних приладів високої точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, яку супроводжують вимі-

рювальний процес [1, с. 147-171; 2, с. 223-298; 3, с. 292-300; 4, с. 208-231; 5, с. 160-187; 6; 7; 8].

Магнітне поле характеризується таким величинами як магнітний потік, магнітна індукція і напруженість магнітного поля. Вимірювані магнітні величини попередньо перетворюються в електричні, більш зручні для вимірювання. Перетворювачі магнітних величин в електричні створюються на основі явищ електромагнітної

індукції, ядерного магнітного резонансу, гальвано-магнітних і деяких інших [1, с. 147-171; 2, с. 223-298; 3, с. 292-300; 4, с. 208-231; 9; 10; 11, с. 88-147].

На теперішній час більшість перетворювачів магнітного поля мають вихідний сигнал у вигляді струму або напруги, що приводить до значних похибок вимірювання внаслідок втрат інформації в каналі між виходом перетворювача і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, малих потужностей вихідного сигналу перетворювачів, їх низькою заводостійкістю і швидкодією [12; 13].

Усунути перераховані недоліки можливо на основі автогенераторних параметричних перетворювачів, які працюють в режимі перетворення “магнітна індукція – частота”, що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [14; 15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одним з перспективних наукових напрямів у створенні перетворювачів магнітного поля є дослідження в області перетворювачів на основі транзисторних структур з від’ємним диференціальним опором, що дозволяє створити прилади з частотним вихідним сигналом. Магнітні автогенераторні параметричні перетворювачі поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і заводостійкістю, що характеризують перетворювачі з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення “магнітна індукція-частота” на основі автогенераторних параметричних перетворювачів суттєво знижує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масо-габаритні показники перетворювачів магнітного поля, підвищити точність і чутливість перетворення інформаційного сигналу [16, с. 125-174; 17; 18; 19].

Постановка завдання.

Метою роботи є створення та дослідження перетворювачів магнітного поля на основі транзисторних автогенераторних параметричних структур, в яких магніторезистор і магнітодіод виступають як первинні перетворювачі магнітного поля, так і як елементи автогенератора, в якому втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією від’ємного диференціального опору. Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі задачі: провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтування використання транзисторних автогенераторних параметричних структур з від’ємним диференціальним опором для побудови магнітних перетворювачів; розробити математичну модель перетворювачів магнітного

поля, в якій враховано залежність параметрів магніточутливих елементів та її вплив на вихідну частоту перетворювача; отримати параметричну залежність вихідної частоти перетворювача від індукції магнітного поля; зробити висновки з проведених досліджень.

Математична модель перетворювачів магнітного поля.

Електрична схема перетворювача з магніточутливим резистивним елементом подано на рис. 1. Вона являє собою інтегральну схему, що складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різними типами провідності, це приводить до появи спадаючої ділянки на вольт-амперній характеристиці на електродах колекторів транзисторів VT1 і VT2. Спадаюча ділянка вольт-амперної характеристики відповідає існуванню на ній від’ємного диференціального опору, що дозволяє будувати автогенератор перетворювача, у коло зворотного зв’язку якого включено магніточутливий резистивний елемент типу КМВ.

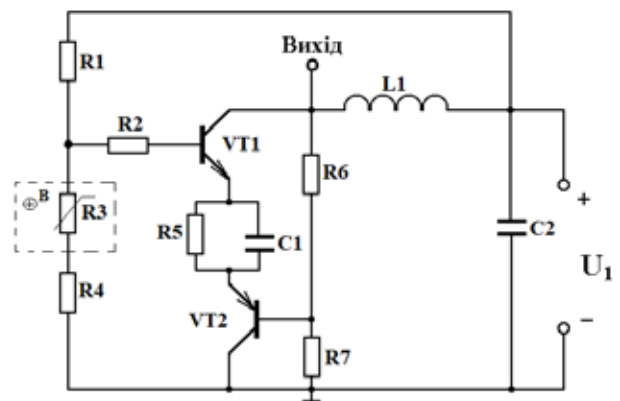


Рис. 1. Електрична схема перетворювача магнітної індукції з магніточутливим резистором

На електродах колектор-колектор транзисторів VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від’ємне значення, а реактивна – ємнісний характер. Підключення індуктивності L1 до колектора VT1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються енергією від’ємного диференціального опору. При дії магнітного поля на магніточутливий резистор R3 відбувається зміна його опору, що приводить до зміни напруги на ньому, яка у свою чергу, змінює робочу точку на вольт-амперній характеристиці автогенератора перетворювача, що приводить до зміни вихідної частоти пристрою. Опори R₁ – R₇ здійснюють живлення перетворювача за допомогою джерела постійної напруги U1. Ємність C1 запобігає проходженню змінного струму через

джерело напруги U_1 . Включення паралельного кола R_5 C_1 у емітерне коло транзисторів VT1 і VT2 дозволяє значно поліпшити термостабільність пристрою.

Перейдемо до розгляду залежності параметрів напівпровідникового матеріалу магніторезистора від магнітної індукції. Зміна електричного опору напівпровідника, по якому протікає електричний струм, під дією магнітного поля, отримав назву магніторезистивного ефекту, або ефекту Гауса. Збільшення електричного опору при поперечному ефекті магнітоопору пояснюється викривленням траєкторії руху частини електронів під дією магнітного поля [1; 20; 21]. Оскільки ефект Хола і магніторезистивний ефект взаємозв'язані і доповнюють один одного, то для отримання кращого магніторезистивного ефекту необхідно значно зменшити вплив ефекту Хола [22].

Зміна електричного опору $R(B)$ напівпровідникового матеріалу в магнітному полі описується формулою [22]

$$R(B) = R_0[1 + f(B)], \quad (1)$$

де R_0 – опір магніторезистора без дії магнітного поля, B – індукція магнітного поля, μ – рухливість носіїв заряду. В слабких магнітних полях функція $f(B)$ залежить від абсолютної величини B і дорівнює $(\mu B)^2$. В сильних магнітних полях, коли $(\mu B) \gg 1$, дорівнює (μB) .

На практиці вплив ефекту Хола можна виключити, якщо на поверхню напівпровідника магніторезистора нанести вузькі металічні смужки для закорочування холівської різниці потенціалів. Смужки повинні бути розташовані перпендикулярно лініям струму і напрямку індукції магнітного поля. Замість нанесення короткозамикаючих металічних смужок на поверхні InSb використовують технологію створення магніторезисторів (InSb+NiSb), при якій матеріал NiSb створює голки дуже малого опору, які при певній орієнтації повністю виключають холівську напругу. Найкращим напівпровідниковим матеріалом при певній геометричній формі є InSb- антимонід індію.

З формули (1) витікає вираз приросту опору магніторезистора при дії слабого магнітного поля [1;23].

$$\Delta R(B) = KR_0 \left[\frac{q}{m^*} \cdot \frac{l}{v} \right]^2 B^2, \quad (2)$$

де q – заряд електрона, m^* – ефективна маса електрона, l – довжина його пробігу, v – швидкість руху електрона, K – коефіцієнт, який враховує розподіл електронів за швидкостями і механізм розсіювання електронів. Як показано в роботах

[1;22], коефіцієнт K в слабких магнітних полях дорівнює 1,17, а в сильних полях дорівнює одиниці, тому його залежність від магнітної індукції практично можна не враховувати. Згідно формули (2) залежність $\Delta R(B)$ від зміни параметрів напівпровідникового матеріалу магніторезистора від магнітної індукції можна представити у вигляді

$$\Delta R(B) = \frac{\partial R}{\partial m^*} \Delta m^*(B) + \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l(B) + \frac{\partial R}{\partial v} \Delta v(B) + \frac{\partial R}{\partial B} \Delta B. \quad (3)$$

Після диференціювання виразу (3) отримуємо формулу

$$\Delta R(B) = \frac{-2R_0 B^2}{m^{*3}} \left[\frac{ql}{v} \right]^2 \Delta m^*(B) + 2R_0 B^2 l \left[\frac{q}{m^* v} \right]^2 \Delta l(B) - \frac{2R_0 B^2}{v^3} \left[\frac{ql}{m^*} \right]^2 \Delta v(B) + 2R_0 B \left[\frac{ql}{m^* v} \right]^2 \Delta B. \quad (4)$$

Формула (4) дозволяє аналітично визначити зміну електричного опору магніторезистора від дії магнітного поля.

Перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти перетворювача від параметрів магніточутливого резистора і параметрів автогенератора перетворювача. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії магнітного поля в енергію змінного електричного поля на виході перетворювача. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії перетворювача. На першому етапі роботи перетворювача енергія магнітного поля перетворюється в енергію електричного поля через напругу на магніторезисторі, яка є вхідною напругою для автогенератора пристрою. В подальшому енергія електричного поля, яка визначається напругою на магніторезисторі, перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю $C_{екв}$ коливального контуру автогенератора перетворювача. Таким чином, коефіцієнт корисної дії перетворювача магнітного поля визначається формулою

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2tI^2 R_0 (\mu_n B)^2}, \quad (5)$$

де $C_{екв}$ – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, U_{\sim} – зміна вихідна напруга перетворювача, t – період коливань змінної напруги U_{\sim} , I – струм через напівпровідник магніотранзистора, μ_n – рухливість електронів у напівпровіднику магніторезистора. З формули (5) визначимо еквівалентну ємність контуру автогенератора

$$C_{екв} = \frac{2\eta t I^2 R_0 (\mu_n B)^2}{U_{\sim}^2}. \quad (6)$$

З другого боку, еквівалентну ємність можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [16]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{екв}} \left[\frac{R_g^2 C_{екв}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

де R_g – від’ємний диференційний опір коливального контуру, L – його індуктивність. З виразу (7) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначимо $C_{екв}$,

$$(4F_0^2 \pi^2 R_g^2 L) C_{екв}^2 - R_g^2 C_{екв} + L = 0. \quad (8)$$

Таким чином, $C_{екв}$ описується виразом

$$C_{екв} = \frac{R_g^2 + \sqrt{R_g^4 - 16F_0^2 \pi^2 R_g^2 L}}{8F_0^2 \pi^2 R_g^2 L}. \quad (9)$$

Вирази (6) і (9) дорівнюють один одному, тому рівняння для визначення резонансної частоти F_0 має вигляд

$$\frac{2\eta t L I^2 R_0 (\mu_n B)^2}{U_{\sim}^2} - \frac{R_g^2 + \sqrt{R_g^4 - 16F_0^2 \pi^2 R_g^2 L}}{8F_0^2 \pi^2 R_g^2 L} = 0. \quad (10)$$

Розв’язок рівняння (10) визначає величину F_0 .

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2}{2\eta t L I^2 R_0 (\mu_n B)^2} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 R_g^2 I^4 R_0^2 (\mu_n B)^4} \right]^{1/2}. \quad (11)$$

Вираз (11) уявляє собою параметричну залежність вихідної частоти перетворювача магнітного поля, яка залежить як від параметрів напівпровідникового магніторезистора, так і від параметрів коливального контуру автогенератора пристрою

при дії магнітного поля, тобто його магнітної індукції. Вираз (11) дозволяє досить просто розрахувати функцію перетворення пристрою, ніж складним шляхом на основі еквівалентної схеми перетворювача, виходячи з розв’язку рівнянь Кірхгофа.

На рис. 2 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення пристрою від магнітної індукції.

Як видно з рис. 2, вихідна частота пристрою змінюється від 500 кГц до 780 кГц при зміні індукції магнітного поля від 0,1 мТ до 120 мТ.

Чутливість сенсора визначається похідною функцією (11) за параметром індукції B . У виразі (11), окрім впливу самої магнітної індукції B , необхідно врахувати залежність вихідної змінної напруги U_{\sim} від магнітної індукції, тоді вираз (11) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[d_1 B^{-2} U_{\sim}^2(B) - d_2 B^{-4} U_{\sim}^4(B) \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$\text{де } d_1 = \frac{1}{2\eta t L I^2 R_0 \mu_n^2}, \quad d_2 = \frac{1}{4\eta^2 t^2 R_g^2 I^4 R_0^2 \mu_n^4}.$$

З врахуванням вищезазначених зауважень, функція чутливості перетворювача описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[d_1 B^{-2} U_{\sim}^2(B) - d_2 B^{-4} U_{\sim}^4(B) \right]^{-1/2} \cdot$$

$$\left[\left(2d_1 U_{\sim}(B) \cdot B^{-2} \cdot \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 2d_1 B^{-3} U_{\sim}^2(B) \right) - \left(4d_2 U_{\sim}^3(B) \cdot B^{-4} \cdot \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 4d_2 B^{-5} U_{\sim}^4(B) \right) \right]. \quad (13)$$

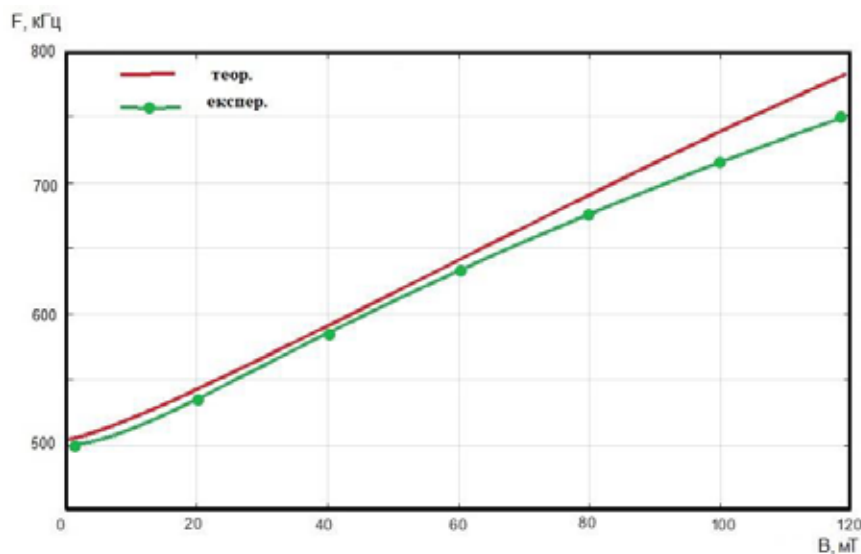


Рис. 2. Розрахункова і експериментальна залежності функції перетворення від магнітної індукції

Графік розрахункової і експериментальної залежності функції чутливості перетворювача від магнітної індукції подано на рис. 3.

Як видно з графіка (рис. 3), чутливість перетворювача у діапазоні від 0,1 мТ до 120 мТ складає від 1,0 кГц/мТ до 2,38 кГц/мТ.

Подальше покращення чутливості перетворювача магнітного поля можливо отримати на основі схеми параметричного автогенераторного пристрою з використанням магніточутливого діода [12; 13]. Електрична схема магнітного перетворювача з магніточутливим діодом подана на рис. 4. Вона являє собою схему, яка подана на рис. 1, окрім того, що пасивна індуктивність $L1$ заміна на активний індуктивний елемент на основі біполярного транзистора $VT3$ з фазозсуваючим електричним колом $R7C2$.

Виникнення індуктивних властивостей у біполярних транзисторах обумовлено кінцевою швидкістю руху носіїв заряду у базовій області. Сигнал, що прикладений до емітера не може з'явитися на колекторному переході, доки носії заряду проходять базу, в результаті чого виникає затримка у часі. Отже, струм колектора відстає у часі від напруги на емітері, яка викликала цей струм, що відповідає індуктивній реакції на електродах емітер-колектор біполярного транзистора. Величина індуктивності та добротності визначається на основі нелінійної моделі індуктивного транзистора, яка базується на моделі Еберса-Молла.

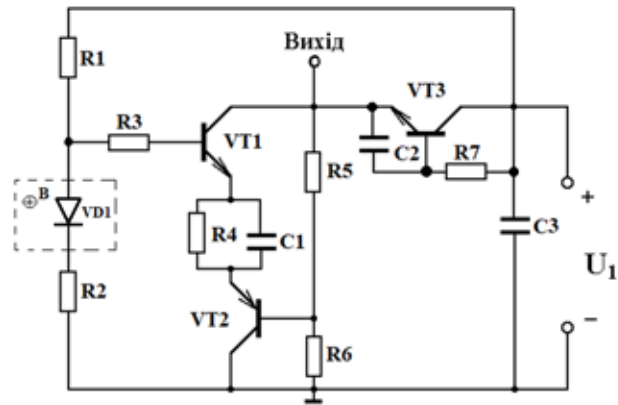


Рис. 4. Електрична схема перетворювача магнітного поля з активною індуктивністю і магнітодіодом

Включення зовнішнього $R7C2$ кола до транзистора дозволяє збільшити як індуктивність, так і добротність активного елемента з однієї сторони, а з іншої сторони – повністю реалізувати як активний індуктивний елемент, так і увесь пристрій за мікроелектронною технологією [16].

Розглянемо роботу магніточутливого діода і його параметри, які необхідні для подальшого розрахунку характеристик перетворювача магнітного поля. В основі роботи магніточутливого діода лежить магнітодіодний ефект. Під магнітодіодним ефектом розуміють різку зміну електричного опору напівпровідникового діода з довгою базою при роботі його у прямому напрямку при дії на

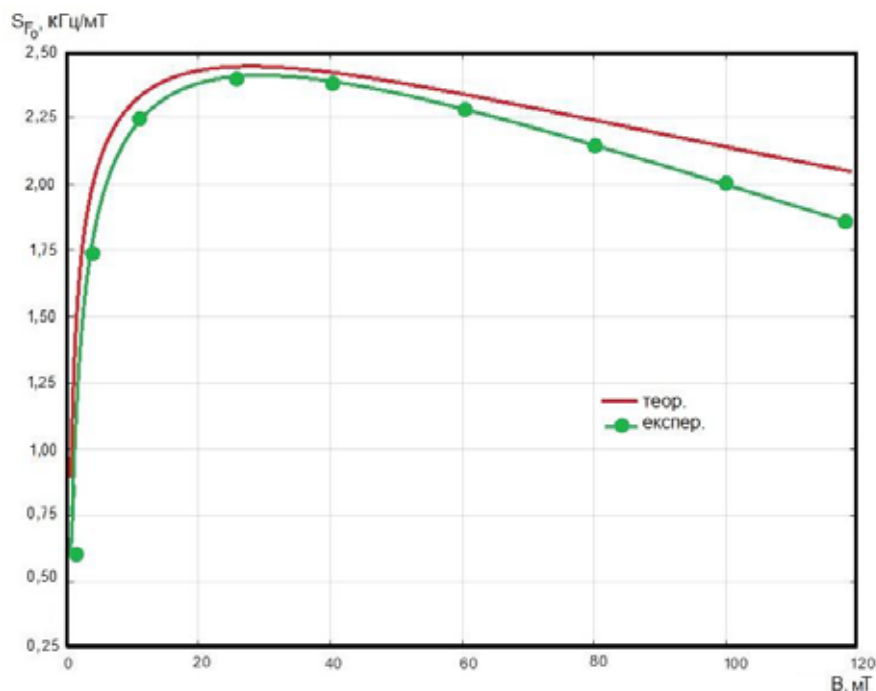


Рис. 3. Залежність функції чутливості перетворювача від магнітної індукції

нього поперечного магнітного поля [13; 15]. Під довгою базою діода розуміють, коли довжина бази дорівнює або більше дифузійної довжини носіїв заряду. При включенні діода у пряму режимі з емітерної р-області в область п-бази інжектуються дірки, концентрація яких зменшується на відстані дифузійної довжини L_D в $e = 2,718$ рази. При високих рівнях інжекції довжина L_D описується формулою [1]

$$L_D^2 = \left(\frac{2b}{b+1} \right) D_C \tau, \quad (14)$$

де $b = \mu_n / \mu_p$ відношення рухливостей електронів і дірок, D_C – коефіцієнт спільної дифузії електронів і дірок, τ – час життя носіїв заряду. Опір п- області, тобто довгої бази, сильно залежить від значення дифузійної довжини. Чим менше величина L_D , тим більшим буде опір бази. При розташуванні магніточутливого діода у магнітному полі таким чином, що вектор магнітної індукції буде перпендикулярним до вектора струму, то коефіцієнт дифузії D_C зменшується внаслідок викривлення траєкторії електронно-діркових пар під дією сили Лоренца. Оскільки концентрація дірок в базі діода наближається до значення концентрації електронів, то при спільній дифузії електронно-діркових пар практично відсутнє поле Хола. Тому магнітне поперечне поле викликає зменшення дифузійної довжини, а це, у свою чергу, приводить до збільшення опору бази. Таким чином, відбувається перерозподіл напруги між п-областю бази і р-п-переходом діода, при цьому напруга на р-п-переході падає, а на п-області зростає при постійному значенні напруги на діоді. Зменшення напруги на р-п-переході викликає зменшення концентрації інжектованих дірок у базу, що приводить до подальшого зростання опору бази. Отже, дія перпендикулярного магнітного поля до площини діода, через який протікає струм, приводить до різкого зростання опору діода при його роботі у прямому режимі.

Перейдемо до розгляду залежності опору бази магнітодіода від магнітної індукції. Виходячи з класичної формули опору напівпровідника в врахуванням виразу (1), опір бази описується формулою

$$R_B = \frac{U_B (\mu_n B)^2}{q \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^{1/2} n_n S}, \quad (15)$$

де U_B – напруга на базовій області діода, n_n – концентрація електронів в базі, S – площа бази.

На основі формули (15) розглянемо залежності параметрів діода від магнітної індукції

$$\Delta R_B(B) = \frac{\partial R_B}{\partial U_B} \Delta U_B(B) + \frac{\partial R_B}{\partial D_C} \Delta D_C(B) + \frac{\partial R_B}{\partial n_n} \Delta n_n(B) + \frac{\partial R_B}{\partial \tau} \Delta \tau(B) + \frac{\partial R_B}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(B) + \frac{\partial R_B}{\partial B} \Delta B. \quad (16)$$

Виконавши диференціювання у виразі (16), отримаємо формулу приросту опору бази від магнітної індукції

$$\begin{aligned} \Delta R_B(B) = & [q n_n S]^{-1} \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} (\mu_n B)^2 \Delta U_B(B) - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} D_C^{3/2} \Delta D_C(B) + \\ & + \frac{1}{2} \tau^{-1/2} [q n_n S]^{-1} \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} U_B (\mu_n B)^2 \Delta \tau(B) - n_n^2 [q S]^{-1} \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^{1/2} \times \\ & \times U_B (\mu_n B)^2 \Delta n_n(B) + 2 [q n_n S]^{-1} \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} U_B \mu_n B^2 \Delta \mu_n(B) + \\ & + 2 [q n_n S]^{-1} \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} U_B \mu_n^2 B \Delta B. \end{aligned} \quad (17)$$

Формула (17) є аналітичним виразом для визначення приросту опору базової області магніточутливого діода від магнітної індукції. Визначивши її, перейдемо до розрахунків параметричної залежності резонансної частоти перетворювача від дії магнітного поля. Метод розрахунку цієї залежності такий самий, як було зроблено вище у цій роботі. Коефіцієнт корисної дії перетворювача з магніточутливим діодом описується формулою

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2tq^2 \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right] n_n^2 S^2 R_{B0} (\mu_n B)^2}, \quad (18)$$

де R_{B0} – опір базової області магнітодіода без дії магнітного поля. З формули (18) визначаємо еквівалентну ємність коливального контуру автогенератора перетворювача

$$C_{екв} = \frac{2\eta tq^2 \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right] n_n^2 S^2 R_{B0} (\mu_n B)^2}{U_{\sim}^2}, \quad (19)$$

Прирівнявши вирази (9) і (19), отримаємо рівняння для визначення параметричної залежності резонансної частоти від дії магнітного поля

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2}{2\eta tq^2 \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right] n_n^2 S^2 R_{B0} L (\mu_n B)^2} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 q^4 \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^2 n_n^4 S^4 R_{B0}^2 R_g^2 (\mu_n B)^4} \right]^{1/2}, \quad (20)$$

Введемо наступні позначення

$$d_3 = \left[2\eta tq^2 \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right] n_n^2 S^2 R_{B0} L (\mu_n B)^2 \right]^{-1}, \quad (21)$$

$$d_4 = \left[4\eta^2 t^2 q^4 \left[\frac{D_C}{\tau} \left(\frac{2b}{b+1} \right) \right]^2 n_n^4 S^4 R_{B0}^2 R_g^2 (\mu_n B)^4 \right]^{-1}, \quad (22)$$

тоді вираз (20) отримає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_{\sim}^2(B) B^{-2} d_3 - U_{\sim}^4(B) B^{-4} d_4 \right]^{1/2}. \quad (23)$$

Вираз (20) є функцією перетворення пристрою, який дозволяє визначити вплив кожного параметра магнітодіода і параметрів автогенератора на вихідну резонансну частоту перетворювача магнітного поля. Це надає можливість ціленаправлено працювати конструкторам сенсорів магнітного поля для підвищення точності, чутливості і вихідної частоти пристроїв.

На рис. 5 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від магнітної індукції. Як видно з графіка (рис. 5), частота змінюється від 710 кГц до 1285 кГц при зростанні магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ.

Чутливість пристрою визначається похідною виразу (23) за параметром індукції B , якщо вважати додатково залежною вихідну напругу перетворювача від індукції. Після проведення необхідних перетворень у формулі (23), функція чутливості S_{F_0} описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(B) B^{-2} d_3 - U_{\sim}^4(B) B^{-4} d_4 \right]^{-1/2} \cdot \left[\left(2U_{\sim}(B) B^{-2} d_3 \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 2B^{-3} U_{\sim}^2(B) d_3 \right) - \left(4U_{\sim}^3(B) B^{-4} d_4 \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 4B^{-5} U_{\sim}^4(B) d_4 \right) \right]. \quad (24)$$

На рис. 6 подано розрахункову і експериментальну залежності функції чутливості пристрою від магнітної індукції

Як видно з графіку (рис. 6), що чутливість перетворювача складає від 3,53 кГц/мТ до 4,95 кГц/мТ в діапазоні зміни магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ.

Висновки

1. Запропоновано автогенераторні параметричні перетворювачі магнітного поля з частотним виходом на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними магніточутливими резистором і діодом, при чому первинні магніточутливі елементи є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію перетворювачів. Запропоновано також замінити пасивну індуктивність коливального контуру автогенератора на активний індуктивний елемент, на основі транзистора з фазозсуваючим RC-колом, що дає можливість розширити діапазон регулювання вихідної частоти, а також повністю виготовляти перетворювачі магнітного поля за мікроелектронною технологією.

2. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних магніточутливих елементах і автогенераторах перетворювачів, розроблено математичні моделі перетворювачів магнітного поля, на основі яких отримано аналітичні параметричні залежності функцій перетворення і чутливості.

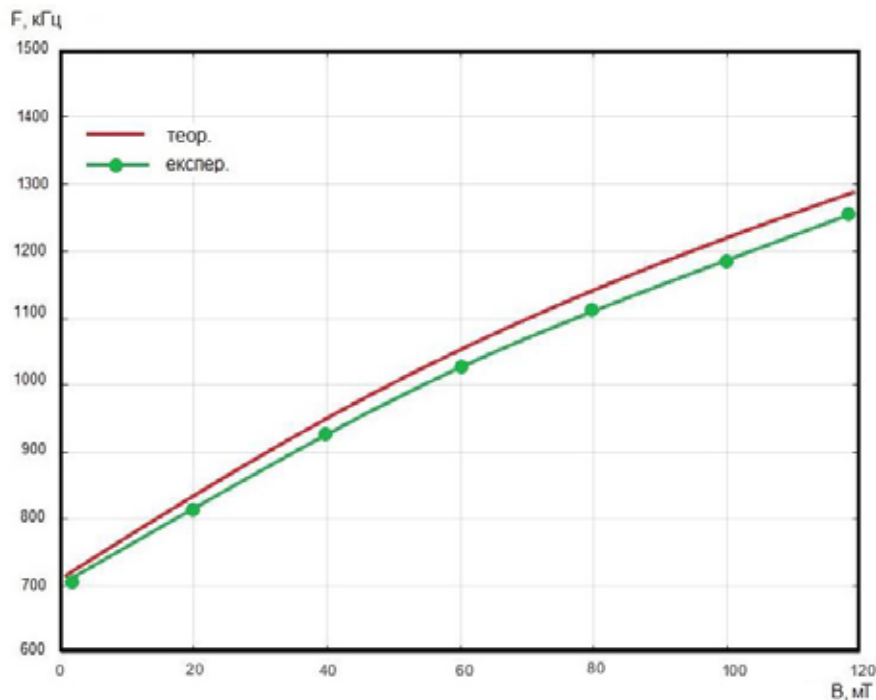


Рис. 5. Розрахункова і експериментальна залежності функції перетворення від магнітної індукції

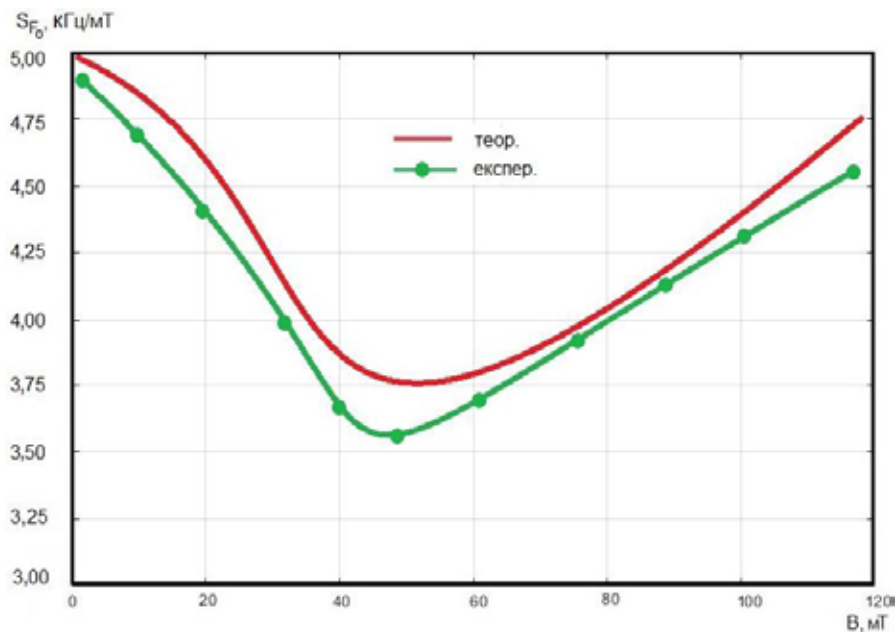


Рис. 6. Розрахункова і експериментальна залежності функції чутливості перетворювача від магнітної індукції

Показано, що основний внесок у функцію перетворення вносить зміна магнітної індукції. Це викликає зміну еквівалентної ємності і диференційного опору коливальної системи автогенераторних пристроїв, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту перетворювачів магнітного поля. Чутливість пристроїв змінюється від 1,0 кГц/мТ до 4,95 кГц/мТ при зміні магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ на частотах від 500 кГц до 1500 кГц.

3. Отримані аналітичні вирази параметричних функцій перетворення і чутливості пристроїв наочно показують вплив кожного параме-

тра первинних магнітних елементів і елементів автогенераторів на вихідну частоту перетворювачів у порівнянні з функціями перетворення, отриманих з еквівалентних схем перетворювачів на основі розв'язку рівнянь Кіргофа. У пристроях вимірювання 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, вони дозволяють передавати інформацію на відстань.

Список літератури:

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том.1. За редакцією З. Ю. Готри. Львів:Ліга-Прес, 2002. 475с.
2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. Москва: Техносфера, 2007. 384 с.
3. Schaumburg H. Sensoren. Stuttgart: Teubner, 1992. 517 p.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012. 624с.
5. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда. Москва: Техносфера, 2007. 368 с.
6. Alvaro Gonzalez, Valentina Zhukova, Paula Corte-Leon, Alexandr Chizhik, Mihail Ipatov, Juan Maria Blanco and Arcady Zhukov. Tuning of Magnetoimpedance Effect and Magnetic Properties of Fe-Rich Glass-Coated Microwires by Joule Heating//Sensors 2022, 22, 1053. <https://doi.org/10.3390/s22031053>
7. Sungjae Ha, Dongwoo Lee, Hoijun Kim, Soonchul Kwon, EungJo Kim and Junho Yang. Neural Network for Metal Detection Based on Magnetic Impedance Sensor // Sensors 2021, 21, 4456. <https://doi.org/10.3390/s21134456>
8. Kittmann A., Durdaut P., Zabel S., Reermann J., Schmalz J., Spetzler B., Meyners D., Sun N.X., McCord J., Gerken M. et al. Wide band low noise love wave magnetic field sensor system // Sci. Rep. 2018, 8, 278.
9. Jana Marie Meyer, Viktor Schell, Jingxiang Su, Simon Fichtner, Erdem Yarar, Florian Niekief at al. Thin-Film-Based SAW Magnetic Field Sensors // Sensors 2021, 21, 8166. <https://doi.org/10.3390/s21248166>

10. Eric Elzenheimer, Christin Bald, Erik Engelhardt, Johannes Hoffmann, Patrick Hayes at al. Quantitative Evaluation for Magnetoelectric Sensor Systems in Biomagnetic Diagnostics // *Sensors* 2022, 22, 1018. <https://doi.org/10.3390/s22031018>
11. Поплавко Ю.М. Основы физики магнитных явлений в кристаллах: Учебное пособие. Киев: НТУУ «КПИ». 2004. 226 с.
12. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом. – 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. – Pp. 212-237.
14. 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, 51–56 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, pp.1-14. ISSN 0277-786X. <https://doi.org/10.1117/12.2501629>.*
16. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница: «Универсум-Винница», 1999. – 275 с.
17. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletskaya 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)*.
18. 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)*.
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. Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. Гальваномагнитные приборы. Москва: Радио и связь, 1983. 104 с.
21. Егiazарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. Москва, Радио и Связь, 1987. 88 с.
22. Вайсс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов их применение. Москва, 1974. 384 с.
23. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. 763 p.

Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. RESEARCH OF AUTOGENERATOR PARAMETRIC MAGNETIC FIELD TRANSDUCERS WITH MAGNETORESISTOR AND MAGNETODIOD

Based on the consideration of physical processes in primary magnetosensitive elements and autogenerator transducers, mathematical models of magnetic field transducers have been developed, on the basis of which analytical parametric dependences of transformation and sensitivity functions are obtained. It is shown that the main contribution to the transformation function is made by the change of magnetic induction. This causes a change in the equivalent capacitance and differential resistance of the oscillatory system in autogenerator devices, which in turn changes the output frequency of the magnetic field transducers.

The obtained analytical expressions of parametric functions of conversion and sensitivity of devices clearly show the influence of each parameter of primary magnetic elements and elements of autogenerators on the output frequency of transducers in comparison with transformation and sensitivity functions obtained from equivalent schemes

Autogenerator parametric magnetic field transducers based on negative differential resistance transistor structures with primary magnetosensitive resistors and diodes are proposed, with primary magnetosensitive elements being active elements of the autogenerator circuit, which simplifies the design of transducers. It is also proposed to replace the passive inductance of the oscillating circuit of the autogenerator with an active inductive element based on a transistor with phase-shifting RC-circuit, which allows to expand the range of output frequency control, as well as fully manufacture magnetic

field transducers by microelectronic technology. Analog-to-digital transducers and amplifier devices are not required in frequency-output magnetic field measuring devices for further processing of information signals, which reduces the cost of information-measuring equipment. The sensitivity of the devices varies from 1.0 kHz/mT to 4.95 kHz/mT when the magnetic induction changes from 0.1 mT to 120 mT at frequencies from 500 kHz to 1500 kHz.

Key words: *transducer, magnetic induction, negative differential resistance, autogenerator, magnetoresistor, magnetodiode.*