

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

АВТОГЕНЕРАТОРНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З БІПОЛЯРНИМ І ПОЛЬОВИМ МАГНІТОЧУТЛИВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ

У роботі розглянуто автогенераторні параметричні сенсори індукції магнітного поля на основі транзисторних структур з диференційним від'ємним опором з магніточутливими елементами на базі біполярного і польового транзисторів, причому чутливі до магнітного поля елементи є також активними елементами схем автогенераторних перетворювачів, що значно спрощує конструктивне рішення параметричних сенсорів індукції магнітного поля.

На основі розгляду фізичних процесів у чутливих до магнітного поля елементах та автогенераторах розроблено математичні моделі параметричних сенсорів індукції магнітного поля, на основі яких отримано основні характеристики автогенераторних сенсорів магнітного поля, таких як параметрична залежність функції перетворення та параметрична залежність чутливості від зміни індукції магнітного поля. На основі досліджень показано, що основний внесок у зміну функції перетворення та функції чутливості вносить зміна індукції магнітного поля. Зміна величини індукції магнітного поля викликає зміну еквівалентної ємності транзисторної структури та диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту розроблених вимірювальних пристроїв. Чутливість розроблених автогенераторних сенсорів індукції магнітного поля змінюється від 9,255 кГц/мТ до 12,400 кГц/мТ при зміні індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

Отримані аналітичні вирази які описують параметричні залежності функцій перетворення автогенераторних параметричних сенсорів індукції магнітного поля показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики параметричних сенсорів магнітного поля і наочно показують вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторних сенсорів індукції магнітного поля на вихідну частоту вимірювальних пристроїв у порівнянні з розрахунками функції перетворення та рівняння чутливості з нелінійних еквівалентних схем пристроїв.

Ключові слова: сенсор, магнітне поле, диференційний від'ємний опір, автогенератор, магніто-транзистор.

Постановка проблеми. Сучасний стан розвитку науки і техніки вимагає створення сенсорів магнітного поля на основі мікроелектронної технології, що дає можливість різко покращити метрологічні показники сенсорів. Вимірювання магнітних величин знаходять велике практичне застосування при дослідженнях властивостей різноманітних матеріалів, наприклад, у вивченні магнітних полів землі, у магнітному неруйнівному контролі, зокрема, магнітній дефектоскопії, а також при вимірювальному контролі магнітних полів в ядерних установках, у військовій та авіаційній техніці, в електроенергетиці, тощо [1, с. 22-56; 2, с. 15-76; 3, с. 287-230; 4, с. 208-230; 5, с. 11-18; 6; 7; 8].

Основними фізичними величинами, які характеризують магнітне поле, є магнітна індукція, магнітний потік, а також напруженість магнітного поля. Магнітні величини, які вимірюються, попе-

редньо перетворюються в електричні величини, які є більш зручними для вимірювання в інформаційно-вимірювальних системах. Параметричні пристрої перетворення магнітних величин в електричні величини базуються на основі фізичних явищ, таких як ядерний магнітний резонанс, електромагнітна індукція, гальваномагнітні та деякі інші явища [9; 10].

На даний час в усіх напрямках інформаційно-вимірювальної техніки, окрім систем телеметрії, використовуються практично тільки такі структурні та схемо технічні рішення, в яких вихідною інформативною величиною є зміна величини напруги або струму, що призводить до появи значних похибок вимірювання фізичних величин, втрати деякої кількості інформації в каналі зв'язку між виходом вимірювального перетворювача та входом підсилювально-перетворювального приладу, а також малих потужностей вихідного інфор-

мативного сигналу вимірювальних перетворювачів, та їх низькою швидкодією і завадостійкістю.

Усунення вище перераховані недоліки можливе при застосування параметричних частотних сенсорів магнітного поля, які працюють на принципі перетворення «індукція магнітного поля – частота», який дозволяє в значній мірі покращити метрологічні показники параметричних перетворювачів [11; 12, с. 124-155].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одним з перспективних наукових напрямків у побудові сенсорних пристроїв індукції магнітного поля є дослідження і розробка сенсорів на основі напівпровідникових структур з диференціальним від'ємним опором, що дозволяє створювати автогенераторні пристрої з частотним виходом.

Сенсори індукції магнітного поля з частотним інформаційним вихідним сигналом поєднують універсальність та простоту, які мають аналогові сенсорні пристрої, з чутливістю, завадостійкістю та точністю, які притаманні сенсорним пристроям з кодовим виходом.

Перетворення частотно-модульованого сигналу отриманого із параметричного сенсора, в подальшому, зводиться до підрахунку періодів чи самої частоти інформативного сигналу упродовж певного часу (часових воріт). Застосування принципу перетворення «індукція магнітного поля – частота» на основі мікроелектронних структур з диференціальним від'ємним опором дозволяє суттєво знизити вартість інформаційно-вимірювальних приладів, а також дозволяє значно зменшити масогабаритні характеристики параметричних сенсорів індукції магнітного поля, підвищити чутливість та точність перетворення фізичної величини [13, с. 35-75; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка та дослідження автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля на основі транзисторних структурах з диференціальним від'ємним опором, в яких біполярний чи польовий магніточутливі транзистори виступають як первинні перетворювачі індукції магнітного поля, а також застосовуються як активні елементи генератора, в якому втрачає енергію в коливальному контурі компенсуються енергією диференційного від'ємного опором.

Для досягнення поставленої мети у даній роботі потрібно розв'язати наступні задачі:

1) провести аналіз існуючих літературних джерел та обґрунтувати застосування транзисторних структур з диференціальним від'ємним опором для побудови автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля;

2) розробити математичні моделі автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля, в яких були б враховані залежності параметрів магніточутливих біполярних та польових транзисторів від дії магнітної індукції і її вплив на вихідну частоту автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля;

3) отримати параметричні залежності функцій перетворення та чутливості автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля від зміни індукції магнітного поля;

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Математичні моделі параметричних сенсорів магнітного поля.

Параметричний сенсор індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом побудований на основі транзисторної структури з диференціальним від'ємним опором, в якій магніточутливим елементом є біполярний магнітотранзистор (рис. 1).

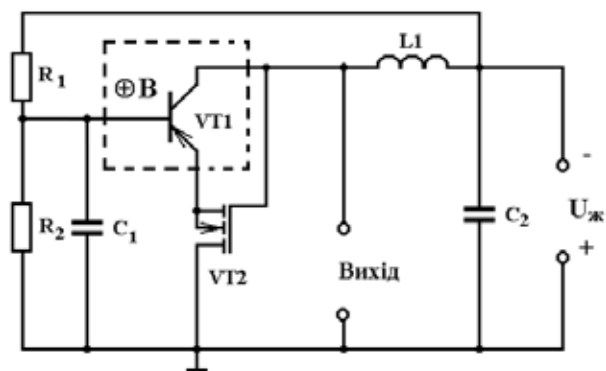


Рис. 1. Електрична схема параметричного сенсора індукції магнітного поля

Автогенераторний параметричний сенсор магнітного поля складається з магніточутливого біполярного транзистора VT1 і польового транзистора VT2, опорів R1-R2, ємності C1, C2 та індуктивності L1. Коливальний контур параметричного сенсора магнітного поля утворений еквівалентною ємністю повного опором на електродах колектора магніточутливого біполярного транзистора VT1 і стоку польового транзистора VT2 та пасивної індуктивності L1.

Під час дії магнітного поля на біполярний магніточутливий транзистор VT1 відбувається зміна еквівалентної ємності коливального контуру, а також зміна диференційного від'ємного опором на виході параметричного сенсора магнітного поля, що викликає суттєву зміну резонансної частоти автогенераторного параметричного сенсора. Втрати енергії в коливальному контурі автоге-

нераторного параметричного сенсора компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. За допомогою опорів R1-R2 здійснюється живлення автогенераторного параметричного сенсора від джерела постійної напруги U1. Ємність C2 запобігає проходженню змінного височастотного струму через джерело живлення U1. Вольтамперна характеристика автогенераторного параметричного сенсора магнітного поля має спадаючу ділянку, яка відповідає диференційному від'ємному опору.

Перейдемо до розрахунку зміни параметрів біполярного магніточутливого транзистора при дії на нього магнітного поля. Біполярний транзистор VT1 включено по схемі із загальним емітером, що забезпечує його кращу чутливість до магнітного поля, ніж його включення за схемою із загальною базою [21]. Під час дії поперекового магнітного поля на базову область біполярного транзистора відбувається скривлення траєкторії інжектованих носіїв заряду під дією сили Лоренца. При малих значеннях потоку магнітної індукції B , яка діє на базу, практично всі носії заряду попадають на колектор. Це еквівалентно тому, що магнітне поле збільшує ефективну довжину бази W . Якщо вектор струму збігається з напрямком швидкості носіїв заряду, відбувається відхилення вектора струму від напрямку електричного поля на деякий кут φ , який отримав назву кута Холла. При малих магнітних полях ($\mu B < 1$) кут Холла дорівнює [22, с. 226].

$$\varphi = \mu_p B l, \quad (1)$$

де μ_p – рухливість дірок для транзистора типу р-п-р, B – магнітна індукція.

Для біполярного транзистора з вузькою базою ($W < L_p$) зміна ефективної довжини бази визначається

$$W = \frac{W_0}{\cos \varphi}, \quad (2)$$

де W_0 – довжина бази без дії магнітного поля.

Розклавши у степеневий ряд $\cos \varphi$, і зберігши перші дві складових розкладу, можна записати

$$W = \frac{W_0}{1 - \varphi^2 / 2} = \frac{W_0}{1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2}. \quad (3)$$

Коефіцієнт передачі струму для вузькобазових біполярних транзисторів h_{21E} описується формулою

$$h_{21E} = \frac{2L_p^2}{W^2}, \quad (4)$$

де L_p – дифузійна довжина дірок.

Підставивши у формулу (4) вираз (3), отримаємо

$$h_{21E} = \frac{2L_p^2(1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2}{W_0^2}. \quad (5)$$

Виходячи з формули (5), струм колектора, який проходить через базу транзистора при дії магнітного поля, приймає вигляд

$$I_K = \frac{2I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2}{W_0^2}, \quad (6)$$

де I_E – струм емітера. При використанні формули (6) опір бази транзистора описується виразом

$$R_B = \frac{U_{KE} W_0^2}{2I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2}, \quad (7)$$

де U_{KE} – напруга на електродах колектор-емітер біполярного магніточутливого транзистора.

Приріст опору бази при дії магнітного поля має вигляд

$$\Delta R_B(B) = \frac{\partial R_B}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(B) + \frac{\partial R_B}{\partial B} \Delta B. \quad (8)$$

Провівши диференціювання у виразі (8), отримаємо

$$\Delta R_B(B) = -\frac{U_{KE} W_0^2}{I_E L_p^2} \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-3} (-\mu_p(B) B^2 \Delta \mu_p(B) - B \mu_p^2(B) \Delta B). \quad (9)$$

Таким чином, знаючи залежність зміни опору бази магніточутливого біполярного транзистора при дії магнітного поля, перейдемо до отримання аналітичної параметричної залежності вихідної частоти автогенераторного сенсора магнітного поля від зміни магнітної індукції. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії магнітного поля в енергію змінного електричного поля на виході автогенераторного сенсора магнітного поля. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії параметричного сенсора. На першому етапі роботи пристрою енергія магнітного поля перетворюється в енергію електричного поля на електродах емітер-колектор магніточутливого транзистора, яка в наступному етапі перетворюється в енергію змінного електричного поля, що зв'язана з еквівалентною ємністю $C_{екв}$ коливального контуру параметричного сенсора магнітного поля. На підставі вище сказаного, коефіцієнт корисної дії пристрою визначається формулою

$$\eta = \frac{C_{екв} U^2 W_0^2}{4t I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2 U_{KE}}, \quad (10)$$

де U – вихідна змінна напруга пристрою,

t – період коливань вихідної змінної напруги U без дії магнітного поля.

З формули (10) визначається еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора

$$C_{екв} = \frac{4\eta t I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2 U_{KE}}{U^2 W_0^4}. \quad (11)$$

З іншої сторони, еквівалентну ємність $C_{екв}$ транзисторної структури можливо визначити

з виразу, який описує резонансну частоту генератора, яка має вигляд [23]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{ekv}} \left[\frac{R_g^2 C_{ekv}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

де R_g – диференційний від'ємний опір в коливальному контурі параметричного сенсора магнітного поля, L – величина індуктивності коливального контуру автогенератора. З формули (12) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначимо еквівалентну ємність C_{ekv}

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{ekv}^2 - R_g^2 C_{ekv} + L = 0. \quad (13)$$

Введемо позначення

$$a_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (14)$$

$$a_2 = R_g^2, \quad (15)$$

$$a_3 = L, \quad (16)$$

$$a_4 = C_{ekv} = \frac{4\eta I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 / 2)^2 U_{KE}}{U_- W_0^2}. \quad (17)$$

Розв'язок квадратного рівняння (13) має вигляд

$$C_{ekv} = \frac{a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1}. \quad (18)$$

Прирівнявши вирази (11) і (18), отримуємо рівняння, з якого визначаємо параметричну залежність вихідної частоти параметричного сенсора від дії магнітного поля на магніточутливий біполярний транзистор

$$a_1 = \frac{a_2}{a_4} - \frac{a_3}{a_4^2}. \quad (19)$$

Підставивши у рівняння (19) значення ($a_1 - a_4$) на основі виразів (14) – (17) і вирішивши його, отримаємо функцію перетворення параметричного сенсора магнітного поля

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_-^2 W_0^2}{4\eta I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 / 2)^2 U_{KE} L} - \frac{U_-^4 W_0^4}{16\eta^2 I_E^2 L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 / 2)^4 U_{KE}^2 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (20)$$

Отримана формула (20) дозволяє простим шляхом розрахувати функцію перетворення параметричного сенсора магнітного поля на основі магніточутливого біполярного транзистора, ніж складним класичним шляхом з нелінійної еквівалентної схеми пристрою на основі розв'язку системи рівнянь Кірхгофа. На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної функцій перетворення параметричного сенсора магнітного поля.

Чутливість параметричного сенсора магнітного поля визначається похідною функції (20) за параметром індукції магнітного поля B . Параметром, який залежить від магнітної індукції B , як показали експериментальні дослідження, є також вихідна змінна напруги U_- параметричного сен-

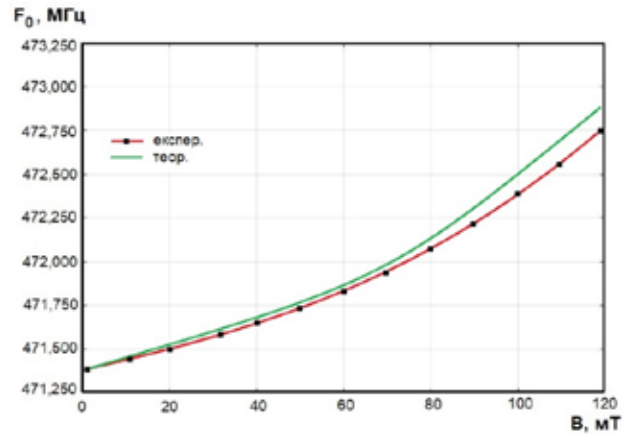


Рис. 2. Залежність функції перетворення параметричного сенсора від зміни індукції магнітного поля

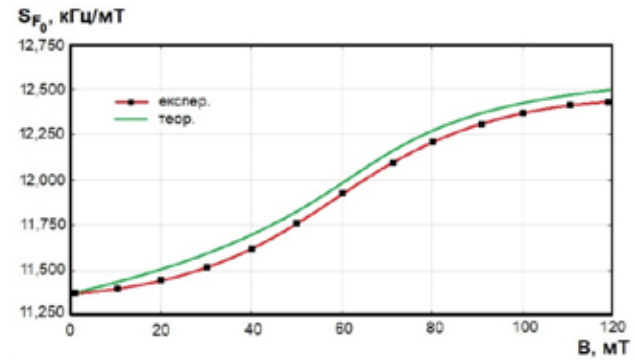


Рис. 3. Залежність функції чутливості параметричного сенсора від індукції магнітного поля

сора. Таким чином, функція перетворення параметричного сенсора магнітного поля з врахуванням залежності її складових від індукції магнітного поля приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_-^2(B) (1 - \mu_p^2(B) B^2 / 2)^{-2} a_5 - U_-^4(B) (1 - \mu_p^2(B) B^2 / 2)^{-4} a_6 \right]^{1/2}. \quad (21)$$

де

$$a_5 = \frac{W_0^2}{4\eta I_E L_p^2 U_{KE} L}, \quad (22)$$

$$a_6 = \frac{W_0^4}{16\eta^2 I_E^2 L_p^2 U_{KE} R_g^2}. \quad (23)$$

З врахуванням виразів (22)-(23), функція чутливості описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_-^2(B) \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-2} a_5 - U_-^4(B) \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-4} a_6 \right]^{1/2} \times \left[2U_-(B) \frac{dU_-(B)}{dB} \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-2} - 2 \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-3} \left(-\mu_p(B) \frac{d\mu_p(B)}{dB} B^2 - B\mu_p^2(B) U_-^2(B) \right) - \right. \quad (24)$$

$$\left. - a_6 \left[4U_-^3(B) \frac{dU_-(B)}{dB} \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-4} - 4 \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-5} \left(-\mu_p(B) \frac{d\mu_p(B)}{dB} B^2 - B\mu_p^2(B) U_-^2(B) \right) \right] \right]$$

Графік розрахункової та експериментальної залежності функції чутливості подано на рис. 3.

Як видно з графіків (рис. 3), чутливість параметричного сенсора магнітного поля змінюється

від 11,325 кГц/мТ до 12,400 кГц/мТ в діапазоні зміни індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

Оскільки магніточутливі транзистори значно спрощують конструкції сенсорів магнітного поля, то також необхідно дослідити і розробити математичну модель пристрою з магніточутливим польовим транзистором з індукованим каналом. Електрична схема параметричного сенсора магнітного поля наведена на рис. 4.

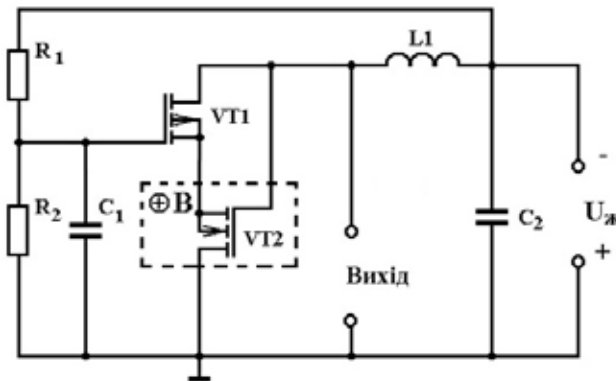


Рис. 4. Електрична схема параметричного сенсора магнітного поля

Вона складається з двох комплементарних польових транзисторів VT1 і VT2. Транзистор VT2 є магніточутливим елементом. Комплементарність польових транзисторів пристрою приводить до появи від'ємного диференційного опору на спадній ділянці вольт-амперної характеристики. Енергія від'ємного диференційного опору компенсує втрати енергії в коливальному контурі автогенератора сенсора. Коливальний контур складається з ємнісної складової повного опору на електродах стік-стік польових транзисторів VT1 і VT2 і пасивної індуктивності L1. Ємність C2 запобігає проходженню високочастотного змінного струму через джерело постійної напруги U1, яке через резистори R1 і R2 живить електричну схему пристрою.

Під час дії поперекового магнітного поля на канал транзистора VT2 з вектором магнітної індукції +В електрони на шляху до стоку будуть відхилятися до підзатворного діелектрика, а при дії вектора магнітної індукції -В – вглиб об'єму напівпровідникової підкладки за рахунок дії сили Лоренца. Струм стоку визначається формулою

$$I_c = S\sigma E, \quad (25)$$

де S – площа каналу, σ – електропровідність каналу, E – напруженість електричного поля в каналі. Якщо на канал діє поперекове магнітне поле, то струм через канал описується виразом

$$I'_c = S\sigma' E, \quad (26)$$

де σ' – електропровідність каналу при дії магнітного поля. Відносна зміна електропровідності каналу при дії магнітного поля має вигляд [22, с. 234]

$$\frac{\sigma - \sigma'}{\sigma} = \frac{\mu_n^2 B^2}{2}, \quad (27)$$

тоді з врахуванням (25), (26) і (27) можливо записати

$$I'_c = I_c \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right). \quad (28)$$

Струм стоку польового транзистора у лінійній області вихідної вольт-амперної характеристики описується формулою [22, с. 129]

$$I_c = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}} \left[(U_3 - U_{ноп}) U_c - \frac{1}{2} U_c^2 \right], \quad (29)$$

де Z – ширина каналу, μ_n – рухливість електронів у каналі, C_0 – ємність підзатворного діелектрика на одиницю площі, U_3 – напруга на затворі відносно витоків, U_c – напруга на стоці відносно витоків, $U_{ноп}$ – порогова напруга.

З врахуванням дії магнітного поля струм стоку можна записати у вигляді

$$I'_c = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}} \left[(U_3 - U_{ноп}) U_c - \frac{1}{2} U_c^2 \right] \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right), \quad (30)$$

Струм стоку в режимі насичення при дії магнітного поля на польовий транзистор має вигляд

$$I'_c = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}} \left[(U_3 - U_{ноп})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) \right], \quad (31)$$

Оскільки робочим режимом польового транзистора є режим насичення, то в подальшому у роботі будемо використовувати формулу (31). Опір каналу магніточутливого польового транзистора з використанням (31) описується виразом

$$R_{кан}(B) = \frac{U_{св} L_{кан}}{Z\mu_n C_0 (U_3 - U_{ноп})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right)}, \quad (32)$$

де $U_{св}$ – напруга на електродах стік-витік транзистора. Приріст опору каналу від дії магнітної індукції визначається формулою

$$\Delta R_{кан}(B) = \frac{\partial R_{кан}}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(B) + \frac{\partial R_{кан}}{\partial B} \Delta B. \quad (33)$$

Виконавши диференціювання у формулі (33), отримуємо вираз

$$\Delta R_{кан}(B) = \frac{U_{св} L_{кан}}{Z C_0 (U_3 - U_{ноп})^2} \left[\Delta \mu_n (-\mu_n^{-2} - B^2 / 2) - B \mu_n(B) \Delta B \right]. \quad (34)$$

Визначивши залежність зміни опору каналу магніточутливого польового транзистора від дії магнітного поля, перейдемо до розрахунку основної характеристики автогенераторного параметричного сенсора це залежності вихідної частоти при дії індукції магнітного поля. Дана залежність визначається аналогічним чином як і для авто

генераторного параметричного сенсора з магніто-чутливим біполярним транзистором, яка була розглянута вище. Вхідна потужність для автогенераторного параметричного сенсора визначається на основі виразу (31) та виразу (32)

$$P_{вх} = \frac{Z\mu_n C_0 (U_3 - U_{нор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) U_{св}}{L_{кан}}, \quad (35)$$

Вихідна потужність визначається формулою

$$P_{вих} = \frac{C_{екв} U_-^2}{2t}, \quad (36)$$

де t – період вихідної напруги пристрою без дії магнітного поля на сенсор. Отже, виходячи з формул (32) і (33), коефіцієнт корисної дії параметричного сенсора магнітного поля дорівнює

$$\eta = \frac{C_{екв} U_-^2 L_{кан}}{2t Z \mu_n C_0 (U_3 - U_{нор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) U_{св}}, \quad (37)$$

З рівняння (37) визначається еквівалентна ємність $C_{екв}$, яка має вигляд

$$C_{екв} = \frac{2\eta t Z \mu_n C_0 (U_3 - U_{нор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) U_{св}}{U_-^2 L_{кан}}, \quad (38)$$

З другого боку, зв'язок еквівалентної ємності коливального контуру параметричного сенсора магнітного поля з резонансною частотою описується виразом (12). Підставивши у формулу (12) вираз (38) і провівши необхідні перетворення, отримуємо параметричну залежність вихідної резонансної частоти параметричного сенсора магнітного поля від зміни індукції магнітного поля, а також від параметрів магніточутливого польового транзистора і параметрів автогенератора

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_-^2 L_{кан}}{2\eta t Z \mu_n C_0 L (U_3 - U_{нор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) U_{св}} - \frac{U^4 L_{кан}^2}{4\eta^2 t^2 Z^2 R_g^2 \mu_n^2 C_0^2 (U_3 - U_{нор})^4 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right)^2 U_{св}^2} \right]^{1/2} \quad (39)$$

Вираз (39) є аналітичним описом функції перетворення автогенераторного параметричного сенсора індукції магнітного поля. На рис. 5 представлено експериментальну та розрахункову залежності функції перетворення пристрою від дії індукції магнітного поля. Відносна похибка між експериментом та розрахунком складає не більше 3 % при вимірюванні індукції магнітного поля в діапазоні від 0 мТ до 120 мТ.

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота автогенераторного параметричного сенсора індукції магнітного поля змінюється від 471,500 МГц до 472,650 МГц при зміні індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

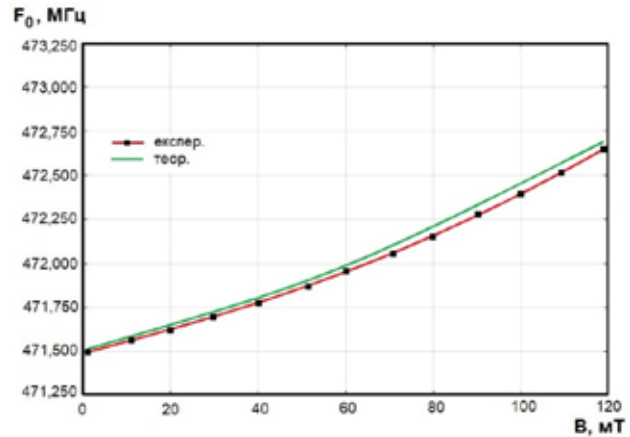


Рис. 5. Залежність функції перетворення автогенераторного параметричного сенсора від зміни магнітної індукції

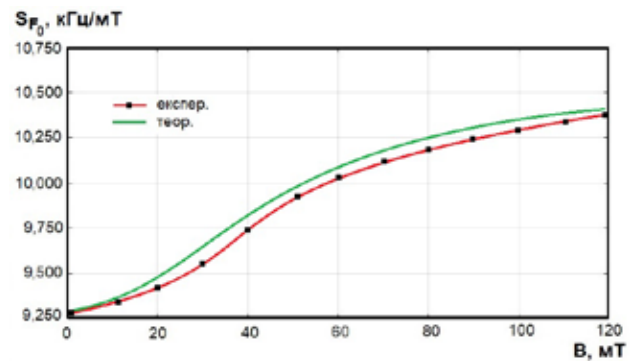


Рис. 6. Залежності функції чутливості параметричного сенсора від зміни магнітної індукції

Функція чутливості визначається на основі виразу (36), при цьому вважається, що рухливість електронів і вихідна напруга також залежить від індукції магнітного поля. Таким чином, функція чутливості описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U^2(B) \mu_n^{-1}(B) \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-1} a_7 - U^4(B) \mu_n^{-2}(B) \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-2} a_8 \right]^{-1/2} \times \\ \times a_7 \left[2U_-(B) \frac{dU_-(B)}{dB} \mu_n^{-1}(B) - \mu_n^{-2}(B) \frac{d\mu_n(B)}{dB} U^2(B) \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-1} - \right. \\ \left. - \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-2} \left(-\mu_n(B) \frac{d\mu_n(B)}{dB} B^2 - 2B\mu_n^2(B) (U^2(B) \mu_n^{-1}(B)) \right) \right] - \\ - a_8 \left[4U_-(B) \frac{dU_-(B)}{dB} \mu_n^{-2}(B) - 2\mu_n^{-1}(B) \frac{d\mu_n(B)}{dB} U^4(B) \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-1} - \right. \\ \left. - 2 \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-2} \left(-\mu_n(B) \frac{d\mu_n(B)}{dB} B^2 - B\mu_n^2(B) (U^4(B) \mu_n^{-2}(B)) \right) \right] \square \quad (40)$$

$$\text{де } a_7 = \frac{L_{кан}}{2\eta t Z C_0 L (U_3 - U_{нор})^2 U_{св}}, \quad (41)$$

$$a_8 = \frac{L_{кан}^2}{4\eta^2 t^2 Z^2 R_g^2 C_0^2 (U_3 - U_{нор})^4 U_{св}^2}. \quad (42)$$

На рис. 6 подано розрахункову та експериментальну залежності функції чутливості параметричного сенсора магнітного поля від зміни індукції магнітного поля.

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість параметричного сенсора магнітного поля змінювалась від 9,255 кГц/мТ до 10,350 кГц/мТ в діапазоні зміни індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

На рис. 7, рис. 8 та рис. 9 представлені скріншоти з програми SDRSharp з приймачем на основі скануючого приймача HackRF One V3. Частота дискретизації (ширина смуги приймача) вибрана на рівні 2,75 МГц. Чим більше її значення, тим ширше ми будемо бачити смугу на

аналізаторі спектру. Вибір ширини смуги пропускання ґрунтується, як правило, на продуктивності комп'ютера. Чим ширша смуга пропускання, тим більше ресурсів необхідно задіяти для програми. Наприклад, ширина пропускання на комп'ютері з процесором Core i5 з оперативною пам'яттю в 16 гігабайт складає 2.75 MSPS.

Як видно з рис. 7, ширина спектру передачі автогенераторних сенсорів магнітного поля без зміни індукції магнітного поля складає 10 кГц в діапазоні

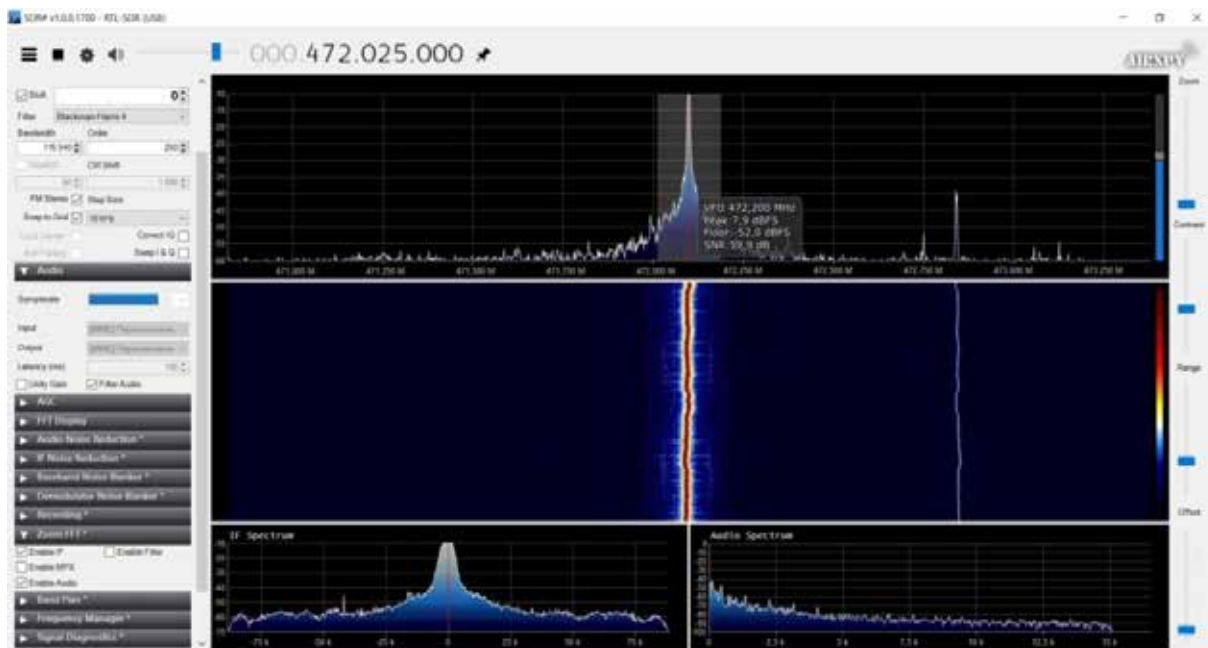


Рис. 7. Спектр передачі автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля без зміни індукції магнітного поля

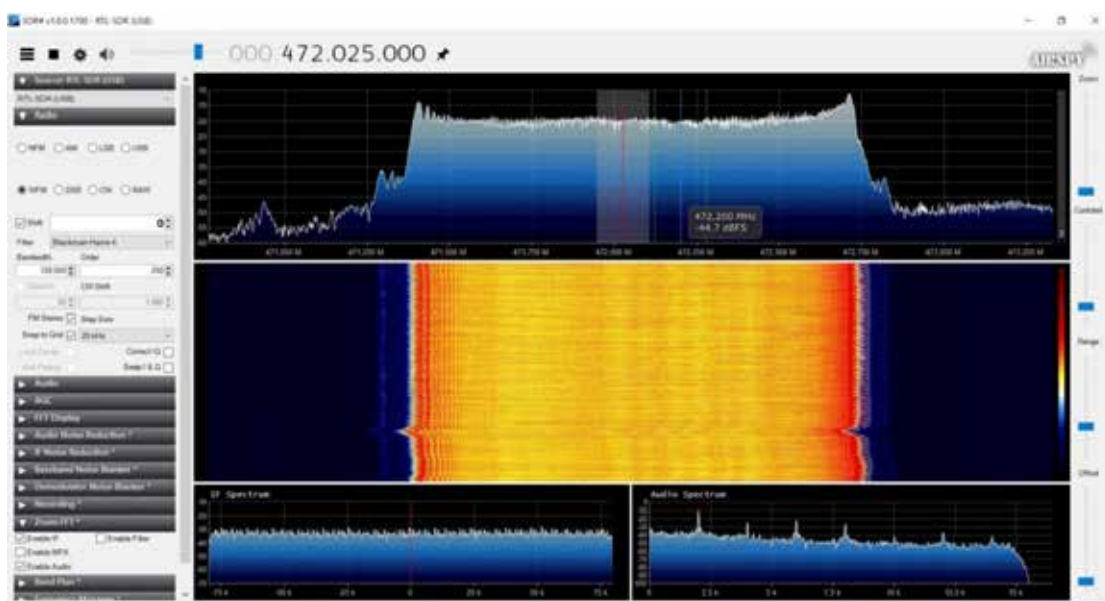


Рис. 8. Спектр передачі автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ

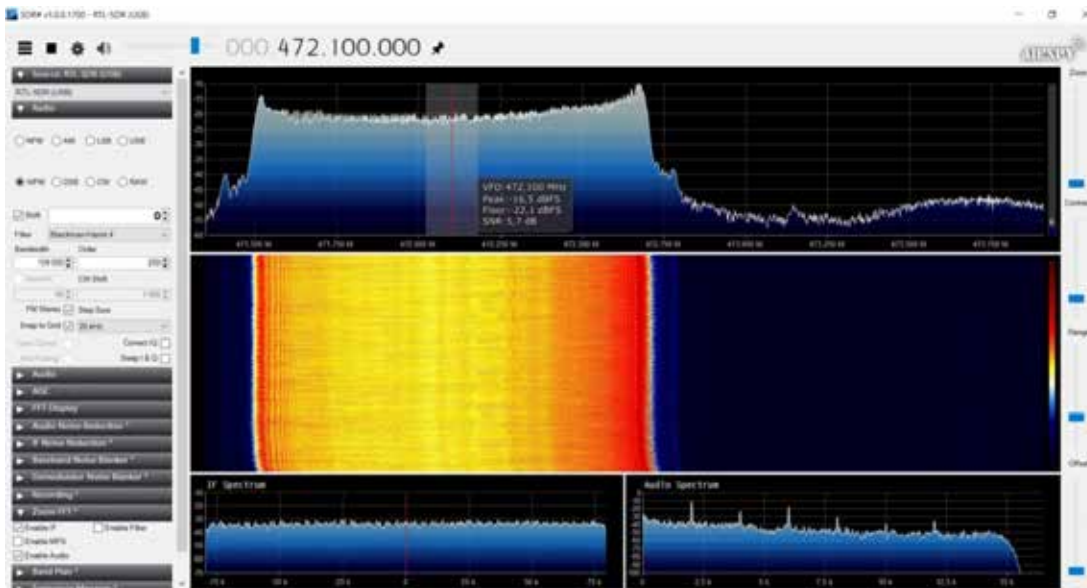


Рис. 9. Спектр передачі автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля на основі двох польових транзисторів при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ

WH711C (426 МГц – 473 МГц) на вибраному каналі (472,025 МГц) при напрузі живлення 5 В. На рис. 8 представлено спектр автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ на частоті 472,025 МГц. Як видно з рис. 8, при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ ширина спектру передачі збільшується до 1400 кГц. На рис. 9 представлено спектр автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля на основі двох польових транзисторів при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ на частоті 472,100 МГц. З рис. 9 видно, що при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ ширина спектру передачі збільшується до 1150 кГц. Даний частотний метод модуляції дозволяє збільшити завадостійкість в 4,5 рази та збільшити дальність передачі при мінімальній потужності передачі.

Висновки

1. У даній роботі представлено дослідження запропонованих автогенераторних параметричних сенсорів індукції магнітного поля на основі транзисторних мікроелектронних структур з диференціальним від'ємним опором та чутливими до магнітного поля елементами на базі біполярного і польового транзисторів, причому чутливі до магнітного поля елементи є також активними елементами схем автогенераторних перетворювачів, що значно спрощує конструктивне рішення параметричних сенсорів індукції магнітного поля.

2. На основі розгляду фізичних процесів у чутливих до магнітного поля елементах та автоге-

нераторах розроблено математичні моделі параметричних сенсорів індукції магнітного поля, на основі яких отримано основні характеристики автогенераторних сенсорів магнітного поля, таких як параметрична залежність функції перетворення та параметрична залежність чутливості від зміни індукції магнітного поля. На основі досліджень показано, що основний внесок у зміну функції перетворення та функції чутливості вносить зміна індукції магнітного поля. Зміна величини індукції магнітного поля викликає зміну еквівалентної ємності транзисторної структури та диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту розроблених вимірювальних пристроїв. Чутливість розроблених автогенераторних сенсорів індукції магнітного поля змінюється від 9,255 кГц/мТ до 12,400 кГц/мТ при зміні індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

3. Отримані аналітичні вирази які описують параметричні залежності функцій перетворення автогенераторних параметричних сенсорів індукції магнітного поля показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики параметричних сенсорів магнітного поля і наочно показують вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторних сенсорів індукції магнітного поля на вихідну частоту вимірювальних пристроїв у порівнянні з розрахунками функцій перетворення та рівняння чутливості з нелінійних еквівалентних схем пристроїв. У автогенераторних

параметричних сенсорах індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом не потрібні АЦП та прецизійні підсилювачі при обробці інформаційних вимірювальних сигналів, що значно здешевлює

вимірювальні системи, а також за допомогою таких пристроїв можлива передача вимірювальної інформації на великі відстані при роботі перетворювачів у надвисоких частотах.

Список літератури:

1. Большакова І.А., Гладун М.Р., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., Лопатинський І. С. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / Національний ун-т Львівська політехніка / З. Ю. Готра (ред.). – Львів: Вид-во Національного університету Львівська політехніка, 2001. –412с.
2. 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.
3. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. –592 с.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. –М.: Техносфера, 2012. –624с.
5. Невлюдов І.Ш., Токарева О.В. Автоматичне управління технологічними об'єктами. – К.: НАУ, 2018. – 200 с.
6. Готра З. Ю. Сенсорні пристрої магнітного поля на структурах інтегральних магнітотранзисторів / З. Ю. Готра, Р. Л. Голяка, І. М. Годинюк, Т. А. Марусенкова, В. Ю. Ільканич // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика, електроніка. - 2011. - Т. 1, Вип. 2. - С. 19-26.
7. Jonas Homrighausen, Ludwig Horsthemke, Jens Pogorzelski, Sarah Trinschek, Peter Glösekötter. Edge-Machine-Learning-Assisted Robust Magnetometer Based on Randomly Oriented NV-Ensembles in Diamond // Sensors 2023, 23(3), 1119.
8. Wei-Ren Chen, Yao-Chuan Tsai, Po-Jen Shih, Cheng-Chih Hsu and Ching-Liang Dai. Magnetic Micro Sensors with Two Magnetic Field Effect Transistors Fabricated Using the Commercial Complementary Metal Oxide Semiconductor Process // Sensors 2020, 20, 4731.
9. Lenz James, Edelstein Alan. Magnetic Sensors and Their Applications // Sensors Journal, IEEE. 2006, N.6. –P.631 - 649. DOI:10.1109/JSEN.2006.874493.
10. Nakai, T. A Uniform Magnetic Field Generator Combined with a Thin-Film Magneto-Impedance Sensor Capable of Human Body Scans. Sensors 2022, 22, 3120.
11. Osadchuk Oleksandr, Vladimir Osadchuk, Andriy Semenov, Iaroslav Osadchuk, Olena Semenova, Serhii Baraban, Maksym Prytula. Radiomeasuring Optical-Frequency Converters Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 48, Springer, Cham. 21 June 2020, pp. 229-261.
12. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2013. – 264 с.
13. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. –275с.
14. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of a Frequency Pressure Transducer Based on a Resonant Tunneling Diode // Physics and chemistry of solid state V. 23, No. 2 (2022) pp. 277-284.
15. 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, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska. IAPGOS, 4/2020, –P.51–56.
16. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода // Вісник Хмельницького національного університету, №4 (287), 2020. –С.160-167.
17. Осадчук Я.О., Осадчук О.В., Осадчук В.С. Автогенераторні параметричні сенсори магнітного поля з елементом Холла і двоколекторним біполярним магнітотранзистором // Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2022 (307) – С.114-122.
18. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Potential of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3. LP22772, 20-22. London, United Kingdom, 2019. – P. 212-237.
19. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance // Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal. 2021. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp)
20. Lien H.L., Chang J.Y. Magnetic Reference Mark in a Linear Positioning System Generated by a Single Wiegand Pulse. Sensors 2022, 22, 3185.

21. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities // Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. Omsk. 978-1-4799-7103-9/15.

22. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – Москва: Радио и связь, 1990. – 264 с.

23. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Generator of Superhigh Frequencies on the Basis Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors // Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. " Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science". Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. –P.336-338.

Osadchuk I.O. SELF-OSCILLATING MICROELECTRONIC MAGNETIC FIELD SENSORS WITH BIPOLAR AND FIELD MAGNETIC-SENSITIVE TRANSISTORS

The paper considers self-oscillating parametric magnetic field induction sensors based on transistor structures with differential negative resistance and magnetically sensitive elements based on bipolar and field-effect transistors, and the elements sensitive to the magnetic field are also active elements of self-oscillating transducer circuits, which greatly simplifies the measurement of magnetic field induction

Based on the consideration of physical processes in magnetic field-sensitive elements and self-oscillators, mathematical models of parametric sensors of magnetic field induction were developed, on the basis of which the main characteristics of self-oscillating magnetic field sensors, such as the parametric dependence of the conversion function and parametric sensitivity on changes in magnetic field induction, were obtained. On the basis of research, it is shown that the main contribution to the change in the conversion function and sensitivity is made by a change in the magnetic field induction. A change in the value of the magnetic field induction causes a change in the equivalent capacitance of the transistor structure and differential negative resistance in the oscillatory system of self-oscillating parametric magnetic field sensors, which in turn changes the output frequency of the developed measuring devices. The sensitivity of the developed self-oscillating magnetic field induction sensors varies from 9.255 kHz/mT to 12.400 kHz/mT when the magnetic field induction changes from 0 to 120 mT.

The obtained analytical expressions describing the parametric dependences of the transformation functions of self-oscillating parametric sensors of magnetic field induction show the possibility of much easier calculation of the main characteristics of parametric magnetic field sensors and clearly show the influence of each parameter of primary converters and parameters of self-oscillating sensors of magnetic field induction on the output frequency of measuring devices. conversion functions and sensitivity equations for non-linear equivalent circuits of devices.

Key words: sensor, magnetic field, differential negative resistance, self-oscillator, magnetotransistor.