

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДІОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОММУНІКАЦІИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.383

Осадчук О. В.¹, Коваль К. О.², Притула М. О.³

¹Д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

³Аспірант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНЗИСТОРНІЙ СТРУКТУРІ

Вирішено завдання вимірювання напруженості магнітного поля радіовимірювальним перетворювачем магнітного поля на біполярних та польовому транзисторах. Запропоновано схемотехнічне рішення радіовимірювального перетворювача, який забезпечує перетворення напруженості магнітного поля в частоту електричного коливання, що дозволяє підвищити чутливість пристрою до напруженості магнітного поля. Проведено експеримент з дослідження розробленого радіовимірювального перетворювача магнітного поля. У результаті проведених експериментів досліджено залежності вихідної частоти та чутливості пристрою від напруженості магнітного поля.

Ключові слова: радіовимірювальний перетворювач, магнітотранзистор, напруженість магнітного поля, чутливість.

ВСТУП

Вимірювання магнітного поля знаходить практичне застосування при дослідженні властивостей матеріалів, у магнітній дефектоскопії, при вивченні магнітного поля Землі, при контролі магнітного поля в різних установках та інше [1].

Загальна тенденція в розвитку пристроїв вимірювання магнітного поля, зумовлена збільшенням вимог точності до них при одночасному ускладненні експлуатаційних умов. Все це обумовлює проводити пошуки і розробку нових фізичних явищ, нових матеріалів, нових методів вимірювання, що дозволило б покращити метрологічні та економічні показники пристроїв вимірювання магнітного поля.

Проблемою високоточного вимірювання магнітних полів займаються як українські (Вікуліна І. М., Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Кухарчук В. В., Осадчук В. С., Осадчук О. В. та інші) так і закордонні вчені (Хомерікі О. К., Аша Ж., Віглеба Г., Егізаряна Г. А., Новицького П. В., Стафеева В. І. та інші).

В сучасній техніці існують надчутливі датчики магнітного поля, які використовують явище надпровідності та ефект Джозефсона. Але конструктивні особливості та-

ких сенсорів дозволяють їх застосовувати лише в лабораторних умовах [2]. Використання інших видів датчиків магнітного поля у складі сучасних інтегральних пристроїв в даний час пов'язано з низкою проблем, серед яких головними є низька чутливість датчика до магнітного поля і відсутність загальної технології виготовлення функціональної інтегральної схеми і датчика. Водночас вдосконалюються алгоритми та схеми перетворення інформативних сигналів датчиків магнітного поля в вимірювальну величину [3].

Перспективним науковим напрямком є розробка та створення первинних радіовимірювальних перетворювачів, які реалізують принцип перетворення «магнітна індукція – частота», на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором. Використання таких приладів виключає з їх конструкції аналого-цифрові перетворювачі, що дозволяє знизити собівартість систем контролю та управління, а також створити «інтелектуальні» високоточні радіовимірювальні перетворювачі магнітного поля в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та сенсора магнітного поля [4].

Таким чином, актуальною науковою задачею є створення високочутливого радіовимірювального перетво-

рювача магнітного поля, який легко може бути реалізований в сучасній інтегральній технології.

Постановка задачі: розробити електричну схему радіовимірювального перетворювача магнітного поля з підвищеною чутливістю та провести її експериментальне дослідження.

Метою статті є розробка електричної схеми радіовимірювального перетворювача магнітного поля з підвищеною чутливістю та її експериментальне дослідження на основі теоретичних засад роботи двоколекторного магнітотранзистора.

АНАЛІЗ ПРИНЦИПУ ДІЇ ДВОКОЛЕКТОРНОГО МАГНІТОТРАНЗИСТОРА

Двоколекторний магнітотранзистор являє собою біполярний транзистор, колектор у якого розділений на дві частини. За відсутності магнітного поля інжектовані емітером носії заряду розподіляються рівномірно між колекторами і їхні струми рівні. Відповідно потенціали колекторів однакові (при рівних колекторних опорах R_K), і різниця напруг між колекторами дорівнює нулю ($U = 0$). Поперечне магнітне поле відхиляє потік носіїв у бік одного з колекторів (K2), що приводить до збільшення його струму і зменшення струму іншого колектора (K1). З цієї причини потенціал одного колектора зменшується, а іншого збільшується і напруга між колекторами росте зі збільшенням індукції магнітного поля. При зміні напрямку магнітного поля змінюється і знак напруги між колекторами [3].

Крім основного ефекту – перерозподілу інжектованих носіїв між колекторами у такому магнітотранзисторі одночасно діє й ефект зміни ефективної довжини бази. Явище зміни ефективної довжини бази знижує чутливість двоколекторного магнітотранзистора, тому що він збільшує струм колектора K1 і зменшує струм колектора K2, тобто його дія протилежна дії ефекту перерозподілу носіїв між колекторами [4].

Проведено розрахунок коефіцієнтів передачі струму двоколекторного магнітотранзистора h_{21B1} і h_{21B2} у колектори K1 і K2 на основі структури рис. 1, де колектори розташовані по всій поверхні його бічних граней. Спо-

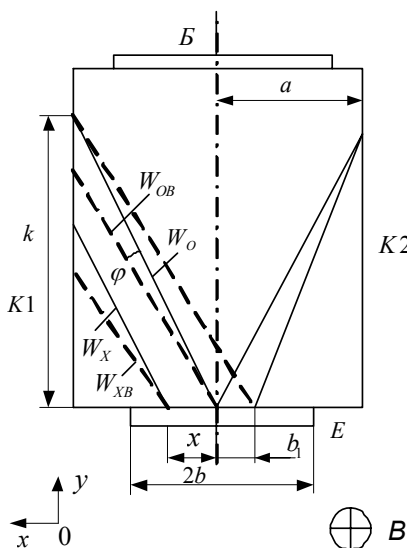


Рисунок 1 – Структура двоколекторного магнітотранзистора

чатку будемо вважати емітер близьким до точкового і розглянемо рух носіїв у бік колектора K1. Інкеровані в базу носії рухаються в напрямку y зі швидкістю $v = \mu E$ (напруженість електричного поля досить велика, так що швидкість дрейфу в цьому напрямку набагато більша швидкості дифузії).

За відсутності магнітного поля $W = W_0$, у магнітному полі носії відхиляються у бік колектора на кут Холла φ і траєкторія їхнього руху скорочується (штрихова лінія на рис. 1). На основі простих геометричних розрахунків, вважаючи $W_0 \approx h$ при невеликих φ ($\text{tg}\varphi \ll 1$) маємо вираз для ефективної довжини бази [3]

$$W_{0B} = W_0 a / (h \cdot \text{tg}\varphi + a) = a^2 E \chi (1 - a \chi E \cdot \text{tg}\varphi), \quad (1)$$

де E – напруженість електричного поля; φ – кут Холла; $\chi = q / (2kT)$; h – відстань, яку проходять інжектовані в базу носії за час дифузії.

Коефіцієнт передачі транзистора та, з врахуванням $\text{tg}\varphi = \mu B$, одержимо

$$h_{21B1} = 1 - (a^2 \chi / \mu \tau) (1 - a \chi E \mu B). \quad (2)$$

У реальній конструкції емітер витягнутий у напрямку x , отже, довжина траєкторії (відстань від емітера до колектора) для носіїв, інжектованих з різних частин емітера, неоднакова. Тому формулою (2) можна користатися лише для малої ділянки dx , розташованої на відстані x від осі симетрії транзистора. Відповідно

$$h_{21B1}(x) = 1 - [(a-x)^2 \chi / \mu \tau] * [1 - (a-x) \chi E \mu B].$$

Струм через відповідну ділянку колектора K1

$$dI_{K1} (I_E / 2b) h_{21B1}(x) dx,$$

а через весь колектор

$$I_{K1} = (I_E / 2b) \int_0^b h_{21B1}(x) dx.$$

Тоді, коефіцієнт передачі струму дорівнює

$$h_{21B1} = (1 / 2b) \int_0^b h_{21B1}(x) dx. \quad (3)$$

Підставивши рівняння (2) в (3) та проінтегрувавши, одержимо вираз [3]

$$h_{21B1} = \frac{1}{2b} \left[b - \frac{\chi}{3\mu\tau} [a^3 - (a-b)^3] + \frac{\chi^2}{4\tau} BE [a^4 - (a-b)^4] \right]. \quad (4)$$

Формула (4) враховує тільки зміну ефективної довжини бази магнітотранзистора. Як видно з рис. 1, дія ефекту перерозподілу носіїв між колекторами полягає в тому, що носії, інжектовані з частини емітера $0 - b_1$, під час відсутності магнітного поля попадають у колектор K2, а під дією магнітного поля відхиляються у бік першого колектора K1. Це еквівалентно тому, що в магнітному полі значення a і b з боку K1 збільшилися на величину b_1 . У малих магнітних полях

$$b_1 \approx W_0 \sin \varphi \approx h \mu B = a^2 \chi E \mu B.$$

У реальних схемах вихідним параметром є напруга між колекторами $U = R_H (I_{K1} - I_{K2}) = R_H I_E (h_{21B1} - h_{21B2})$. Враховуючи (4),

$$h_{21B1} - h_{21B2} = [\chi^2 BE / (4b\tau)] [a^4 - (a-b)^4]. \quad (5)$$

Таким чином, в слабких магнітних полях основний внесок у магніточутливість дає зміна ефективної довжини бази. З метою збільшення чутливості в структуру двоколекторного магнітотранзистора можна ввести додатковий базовий контакт. При проходженні струму основних носіїв через базові електроди Б2 і Б1 у базі виникає ЕРС Холла, яка спрямована так, що відхиляє інжектовані носії у одному напрямку з силою Лоренца. Отже, перерозподіл інжектованих носіїв між колекторами збільшується. Крім того, прикладена до контактів Б2 і Б1 напруга збільшує напруженість електричного поля в базі, що приводить до збільшення швидкості руху інжектованих носіїв, а відповідно і сили Лоренца.

Відповідно до принципу дії біполярного транзистора включення контакту Б2 еквівалентно шунтуванню емітерного $p-n$ переходу і зменшенню струму через нього. При однакових робочих струмах чутливість двоколекторних магнітотранзисторів на два-три порядки вище чутливості сенсорів Холла [5]. Збільшена чутливість і лінійність характеристики при малих магнітних полях дозволяють використовувати магнітотранзистори як сенсори слабких магнітних полів (відтворюючі магнітні голівки, електронні компаси тощо). При цьому в значних магнітних полях чутливість зменшується тому, що всі носії вже перерозподілені, і напруга збільшується виключно через зменшення ефективної довжини бази. В даному радіовимірювальному частотному перетворювачі магнітного поля на транзисторній структурі використовуємо двоколекторний магнітотранзистор в якості чутливого елемента.

РОЗРОБКА РАДІОВІМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Розроблено структурну схему радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним

виходом (рис. 2), в якій використовується двоколекторний магнітотранзистор та частотний перетворювач на основі двох біполярних та одного польового транзисторів.

В магніточутливому радіовимірювальному перетворювачі відбуваються три етапи перетворення енергії: енергія магнітного поля перетворюється в енергію зміни опору; енергія зміни опору перетворюється в енергію зміни еквівалентної ємності; енергія зміни еквівалентної ємності в енергію зміни частоти.

Електрична схема розробленого радіовимірювального частотного перетворювача для вимірювання напруженості магнітного поля наведена на рис. 3.

Як датчик магнітного поля використовується двоколекторний біполярний магнітотранзистор $VT1$. Частотний перетворювач утворено напівпровідниковими активними елементами: біполярні транзистори $VT4$ (BC847), $VT3$ (BC857), та польовий транзистор $VT2$ (BF998).

Основою пристрою є автогенератор, утворений транзисторною структурою $VT2$, $VT3$ та активною індуктивністю ($VT4$, $C1$, $R9$). Резистори $R5-R8$ забезпечують розміщення робочої точки транзисторів на спадній ділянці ВАХ транзисторної структури. Двоколекторний магнітотранзистор ввімкнено в схему перетворювача паралельно до транзисторної структури з від'ємним опором.

Оскільки, вольт-амперна характеристика на вихідних клеммах частотного перетворювача має спадну ділянку, то частотний перетворювач виступає генератором електричних коливань з певною частотою. При впливі зовнішнього магнітного поля на двоколекторний магнітотранзистор, змінюється напруга вихідного сигналу на його колекторі $K1$. При зміні напруги керування, яка є одночасно і напругою вихідного сигналу двоколекторного магнітотранзистора, змінюється частота генерації час-

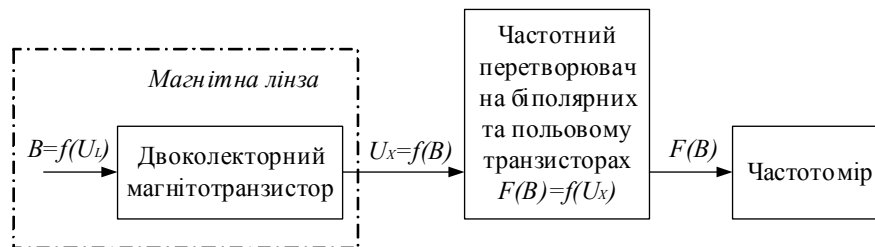


Рисунок 2 – Структурна схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля на транзисторній структурі

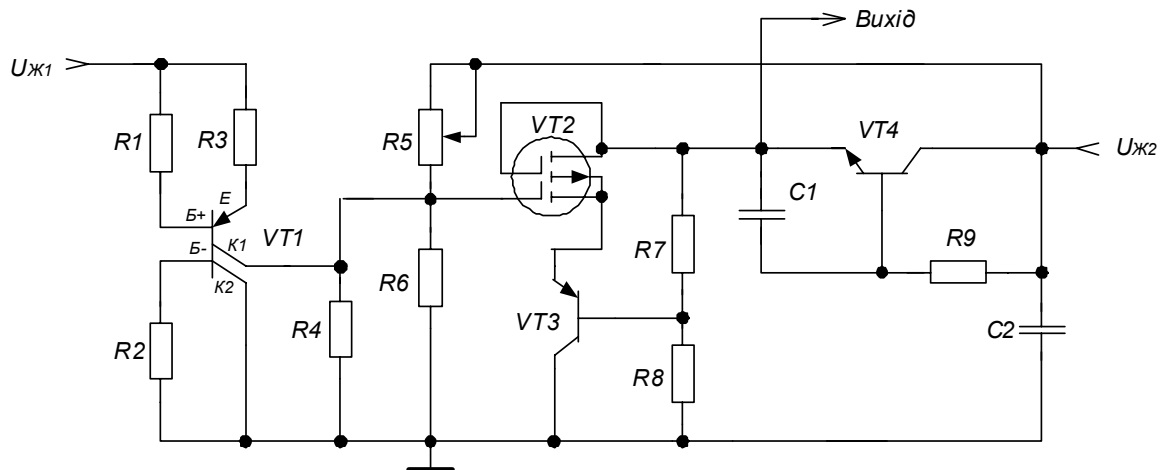


Рисунок 3 – Електрична схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля на транзисторній структурі

тотного перетворювача. Таким чином, чим вища напруженість магнітного поля, тим більша частота генерації вихідного колювання у радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО МАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

За результатами експериментальних досліджень було побудовано графіки залежності частоти генерації від напруженості магнітного поля (функції перетворення) рис. 4 при різних напругах керування.

Як показано на рис. 4, коли на магнітний сенсор діє лише природне магнітне поле Землі та відсутній вплив зовнішнього штучного магнітного поля, то при різних напругах керування частотний перетворювач має різні початкові частоти генерації. При напрузі керування $U_K = 1,6\text{В}$ чутливість приладу максимальна, оскільки діапазон зміни частоти на виході досліджуваного пристрою становить від 900 кГц до 1065 кГц.

При подальшому збільшенні напруги керування діапазон зміни частоти на виході становить відповідно для $U_K = 1,8\text{В}$ від 1050 кГц до 1198 кГц, та для $U_K = 2\text{В}$ – від 1150 кГц до 1261 кГц. Таким чином, чутливість пристрою зменшується при збільшенні напруги керування.

Використовуючи експериментальні табличні дані та програму TableCurve2D, визначено аналітичний опис функції перетворення радіовимірювального перетворювача на основі біполярних, польового та магніточутливого двоколекторного транзисторів.

Найбільш оптимальною є функція перетворення

$$F(B) = a + \frac{b}{1 + \exp\left(\frac{-B+c}{d}\right)}, \quad (6)$$

де B – напруженість магнітного поля, а невідомі коефі-

цієнти мають наступні величини: $a=-548,14$; $b=2477,5427$; $c=-1189,9973$; $d=3405,9786$.

Використовуючи програму TableCurve2D, було встановлено, що відносна похибка функції перетворення становить $\pm 0,5\%$.

За результатами експериментальних досліджень побудовано графік залежності чутливості радіовимірювального

перетворювача $S(B) = \left| \frac{d(F(B))}{dB} \right|$ від напруженості магнітного поля при напрузі керування $U_K = 1,6\text{В}$ (рис. 5).

Як показано на рис. 5, чутливість пристрою змінюється в залежності від рівня зовнішнього магнітного поля. Наприклад, при напруженості магнітного поля 100 мТл, чутливість пристрою становить 0,1765 кГц/мТл, а при рівні поля 1000 мТл – 0,1645 кГц/мТл. При порівнянні з попередніми результатами, досліджуваний радіовимірювальний перетворювач магнітного поля на біполярних та польовому транзисторах має більш лінійну залежність чутливості від магнітного поля ніж радіовимірювальний перетворювач, який був досліджений в [5].

ВИСНОВКИ

У статті досліджено виникнення інформативних сигналів у двоколекторному магнітотранзисторі при впливі на нього магнітного поля. Розроблено структурну та електричну схему радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом.

При використанні розробленого радіовимірювального частотного перетворювача для вимірювання магнітного поля, ми в 4 рази підвищили точність вимірювання напруженості магнітного поля ніж у випадку застосування для вимірювання двоколекторного магнітотранзистора.

Також експериментально встановлено, що максимальна чутливість даного варіанта радіовимірювального перетворювача магнітного поля становить 0,1765 кГц/мТл. При

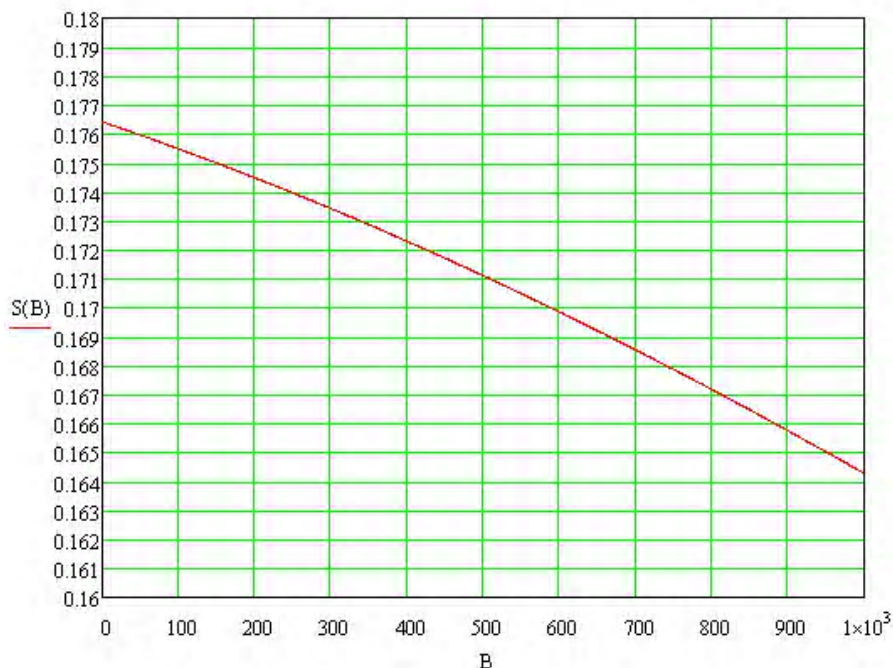


Рисунок 5 – Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача від напруженості магнітного поля

цьому, відносна похибка перетворювача не перевищує $\pm 0,5\%$. При зміні напруженості магнітного поля в діапазоні 0 мТл ... 1000 мТл, досягнуто зміни частоти вихідного сигналу в діапазоні 900 кГц ... 1065 кГц. Перевагою розробленого перетворювача є більша лінійність характеристики чутливості, яка змінюється в межах від 0,1765 кГц/мТл до 0,1645 кГц/мТл.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : в 3 т. Т. 3. / З. Ю. Готра – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
2. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом: монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук]; під ред.

Осадчук А. В.¹, Коваль К. О.², Притула М. А.³

¹Д-р. техн. наук, професор, завідує кафедрою радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

³Аспірант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЕ

Решена задача измерения напряженности магнитного поля радиоизмерительным преобразователем магнитного поля на биполярных и полевому транзисторах. Предложено схемотехническое решение радиоизмерительного преобразователя, который обеспечивает преобразование напряженности магнитного поля в частоту электрического колебания, что позволяет повысить чувствительность устройства к напряженности магнитного поля. Проведен эксперимент по исследованию разработанного радиоизмерительного преобразователя магнитного поля. В результате проведенных экспериментов исследовано зависимости выходной частоты и чувствительности устройства от напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: радиоизмерительный преобразователь, магнитотранзистор, напряженность магнитного поля, чувствительность.

Osadchuk O. V.¹, Koval K. O.², Prytula M. O.³

¹Dr.Sc., Professor, Head of the department of radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

²PhD, Associate professor, Associate professor of department of radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

³Graduate student of department of radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

THE RADIO MEASURING CONVERTER OF THE MAGNETIC FIELD BASED ON TRANSISTORS STRUCTURE

The problem of measuring the magnetic field strength of radio transmitter magnetic field on bipolar and field-effect transistors is solved. The circuit solution of radio measuring transducer is offered. It converts the magnetic field in the electrical oscillations frequency, that improves the sensitivity of the device to the intensity of the magnetic field. An experiment on proposed radio measuring transducer of the magnetic field is conducted. As a result of the experiment, we had the output frequency depending on the sensitivity of the device and the strength of the magnetic field.

Keywords: radiomeasuring converter, magnetic transistor, magnetic field strength, the sensitivity.

REFERENCES

1. Gotra Z. U. Microelectronni sensory fizychnykh velychyn: v 3 t. T. 3. Lviv, Liga-Pres, 2002, 475 p.
2. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V.; pid red. V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk. Microelectronni sensory magnitnogo polya z chastotnym vihodom: monografiya. Vinnytsia, VNTU, 2013, 254 p.

3. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. 12-ое издание. В 2-х томах / У. Титце, К. Шенк. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 828 и 942 с.
4. Minin I. V. Microsensors / I. V. Minin, O. V. Minin. – India, Croatia : InTech, 2011. – 306 p.
5. Осадчук О. В. Радіовимірвальний перетворювач магнітного поля з магнітотранзистором та частотним вихідним сигналом / О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 1. – С. 102–106.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2015.

Після доробки 15.02.2016.