

## РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З МАГНІТОТРАНЗИСТОРОМ ТА ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ

*У статті розроблено радіовимірювальний перетворювач магнітного поля з двоколекторним магнітотранзистором та частотним вихідним сигналом. Принцип роботи розробленого радіовимірювального перетворювача магнітного поля базується на основі автогенератора на транзисторній структурі з від'ємним опором. Також проведено експериментальні дослідження залежності частоти вихідного коливання розробленого радіовимірювального перетворювача від напруженості магнітного поля.*

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

O.V. OSADCHUK, M.O. PRYTULA, K.O. KOVAL  
Vinnytsya National Technical University

### THE RADIOMEASURING CONVERTER OF THE MAGNETIC FIELD WITH MAGNETIC TRANSISTOR AND FREQUENCY OUTPUT SIGNAL

*The radiomeasuring converter of the magnetic field with magnetic transistor and frequency output signal was developed. The principle of the developed radiomeasuring converter of the magnetic field is based on the oscillator on the transistor structure with negative resistance. Also the experimental research output oscillation frequency depends developed transducers on the magnetic field is conducted.*

*Keywords: radiomeasuring converter, magnetic transistor, the magnetic field.*

#### Вступ

Одним з перспективних напрямків сучасної напівпровідникової мікроелектроніки є розробка датчиків магнітного поля (ДМП), здатних визначати напрямок і вимірювати напруженість магнітного поля. Вони широко використовуються в медицині, в автомобілебудуванні, в дефектоскопії, в геології при дослідженні нових родовищ, при розробці позиціонуючих і навігаційних систем і в багатьох інших сферах [1].

Використання існуючих ДМП у складі сучасних інтегральних пристроїв в даний час пов'язане з низкою недоліків, основними з яких є низька чутливість ДМП до магнітного поля і відсутність універсальної технології виготовлення функціональної інтегральної схеми і ДМП під час одного технологічного циклу. Актуальним завданням є розробка сучасних ДМП для їх використання у складі мікросистеми та конструкції і технології повного інтегрального виконання елементів датчика за допомогою КМОП технології [2].

Головним компонентом магніточутливої мікросистеми є магніточутливого елемент (МЧЕ), що перетворює магнітний потік в електричний сигнал. Найбільш важливим параметром МЧЕ є магнітна чутливість. Одним із МЧЕ є двоколекторний біполярний магнітотранзистор (ДКБМТ). Важливими властивостями ДКБМТ є лінійність вихідного сигналу, висока роздільна здатність, високе відношення сигнал-шум, можливість створення тривимірних векторних датчиків магнітного поля [1].

Таким чином, розробка, вивчення та експериментальне дослідження радіовимірювального перетворювача, де в якості магніточутливого елементу використовується двоколекторний магнітотранзистор, є актуальним завданням.

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

#### Аналіз принципу дії двоколекторного магнітотранзистора

Двоколекторний магнітотранзистор являє собою біполярний транзистор, колектор у якого розділений на дві частини (рис. 1, а). За відсутності магнітного поля інжектовані емітером носії заряду розподіляються рівномірно між колекторами і їхні струми рівні. Відповідно потенціали колекторів однакові (при рівних колекторних опорах  $R_k$  рис. 1, а), і різниця напруг між колекторами дорівнює нулю ( $U = 0$ ). Поперечне магнітне поле відхиляє потік носіїв у бік одного з колекторів ( $K_2$ ), що приводить до збільшення його струму і зменшення струму іншого колектора ( $K$ ). 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. Наприклад, у  $p-n-p$  транзисторі (рис. 1, а) зміна траєкторії руху дірок у магнітному полі приводить до того, що ефективна довжина бази в лівій частині транзистора зменшується, а в правій збільшується. Явище зміни ефективної довжини бази знижує чутливість двоколекторного магнітотранзистора, тому що він збільшує струм колектора  $K$  і зменшує струм колектора  $K_2$ , тобто його дія протилежна дії ефекту перерозподілу носіїв між колекторами [2].

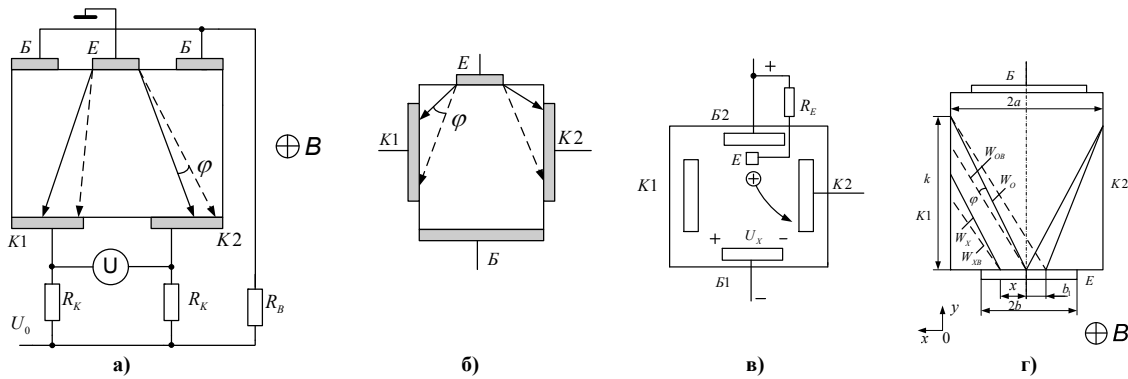


Рис. 1. Структури двоколекторних магніотранзисторів

Цей недолік усунутий у структурі магніотранзистора, показаного на рис. 1, б. Магнітне поле в цьому випадку також перерозподіляє інжектовані носії з одного колектора в другий. Одночасно воно зменшує ефективну довжину бази в тій частині зразка, де струм колектора K2 збільшується, і збільшує в тій частині, де струм колектора K зменшується. Отже, зміна ефективної довжини бази приводить до додаткового збільшення струму колектора K2 і додатковому зменшенню струму колектора K.

Проведено розрахунок коефіцієнтів передачі струму двоколекторного магніотранзистора  $h_{21B1}$  і  $h_{21B2}$  у колектори K і K2 на основі структури рис. 1, г, де колектори розташовані по всій поверхні бічних граней. Спочатку будемо вважати емітер близьким до точкового і розглянемо рух носіїв у бік колектора K. 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). Одночасно вони дифундують у поперечному напрямку  $x$  і попадають у колектор K через час дифузії  $\tau_D = a^2 / (2D)$ . У напрямку  $y$  вони проходять за цей час відстань  $h = v\tau_D = \mu E a^2 / (2D) = a^2 E \chi$ , де  $\chi = q / (2kT)$ . Ефективна довжина бази  $W_0^2 = a^2 + h^2$ . Коефіцієнт передачі струму звичайного транзистора з довгою базою при дрейфовому переносі [1]

$$h_{21B} = \exp(-W / \mu E \tau) \approx 1 - (W / \mu E \tau), \tag{1}$$

де  $W$  – довжина бази (експонента розкладена в ряд, оскільки показник менший),  
 $\tau$  – час життя інжектованих носіїв.

За відсутності магнітного поля  $W = W_0$ . У магнітному полі носії відхиляються у бік колектора на кут Холла  $\varphi$  і траєкторія їхнього руху скорочується (штрихова лінія на рис. 1, г). На основі простих геометричних розрахунків, вважаючи  $W_0 \approx h$  при невеликих  $\varphi$  ( $tg\varphi \ll 1$ ) з рис. , г, маємо [1]

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

Підставивши рівняння (2) в (1), з врахуванням  $tg\varphi = \mu B$  одержимо

$$h_{21B1} = 1 - (a^2 \chi / \mu \tau) (1 - a \chi E \mu B). \tag{3}$$

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 (3) 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 K дорівнює

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

а через весь колектор

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

Тоді, коефіцієнт передачі струму дорівнює

$$h_{21B1} = (1 / 2b) \int_0^b h_{21B1}(x) dx. \tag{4}$$

Підставивши рівняння (3) в (4) та проінтегрувавши, одержимо вираз [3]

$$h_{21B1} = \frac{1}{2b} \left( b - \frac{\chi}{3\mu\tau} [a^3 - (a-b)^3] + \frac{\chi^2}{4\tau} BE [a^4 - (a-b)^4] \right). \tag{5}$$

Вираз для  $h_{21B1}$  відрізняється лише зміною знака перед доданком з  $B$ . Формула (5) враховує тільки зміну ефективної довжини бази магніотранзистора. Як видно з рис. , г, 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 K. Це еквівалентно тому, що в

магнітному полі значення  $a$  і  $b$  з боку К збільшилися на величину  $b_1$ . У малих магнітних полях

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

Відповідно в (5) необхідно у фігурній дужці замінити  $a$  і  $b$  на  $a + b_1$  і  $b + b_1$ .

У реальних схемах вихідним параметром є напруга між колекторами  $U = R_H (I_{K1} - I_{K2}) = R_H I_E (h_{21B1} - h_{21B2})$ . Із виразу (5) маємо [1]

$$h_{21B1} - h_{21B2} = [\chi^2 BE / (4b\tau)] [a^4 - (a - b)^4]. \tag{6}$$

Аналіз отриманого виразу демонструє, що 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 (Б2 на рис. 1, в). При проходженні струму основних носіїв через базові електроди Б2 і Б у базі виникає ЕРС Холла, що спрямована так, що відхиляє інжектовані носії у ту ж сторону, що і сила Лоренца. Отже, перерозподіл інжектованих носіїв між колекторами збільшується. Крім того, прикладена до контактів Б2 і Б напруга збільшує напруженість електричного поля в базі, що приводить до збільшення швидкості руху інжектованих носіїв, а відповідно і сили Лоренца [3].

На рис. 2 зображена типова залежність напруги між колекторами від індукції магнітного поля для планарного магнітотранзистора, структура якого зображена на рис. 1, в. [2]

Відповідно до принципу дії біполярного транзистора включення контакту Б2 еквівалентно шунтуванню емітерного  $p-n$  переходу і зменшенню струму через нього. Проте, як видно з рис. 2, магніточутливість збільшується, що пояснюється збільшенням напруженості електричного поля в базі і ЕРС Холла. При однакових робочих струмах чутливість двоколекторних магнітотранзисторів на два-три порядки вище чутливості сенсорів Холла. Збільшена чутливість і лінійність характеристики при малих магнітних полях дозволяють використовувати магнітотранзистори як сенсори слабких магнітних полів (відтворюючі магнітні голівки, електронні компаси і тощо). При цьому в значних магнітних полях чутливість зменшується тому, що всі носії вже перерозподілені, і напруга збільшується виключно через зменшення ефективної довжини бази [2].

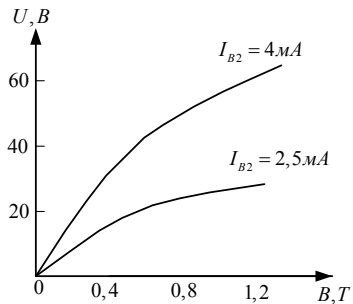


Рис. 2. Залежність напруги між колекторами магнітотранзистора від магнітної індукції для різних струмів бази при  $I_{B2} + I_E = 5$  мА.

### Розробка радіовимірювального перетворювача магнітного поля

Розроблено структурну схему радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом (рис. 3), яка складається з двоколекторного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів.

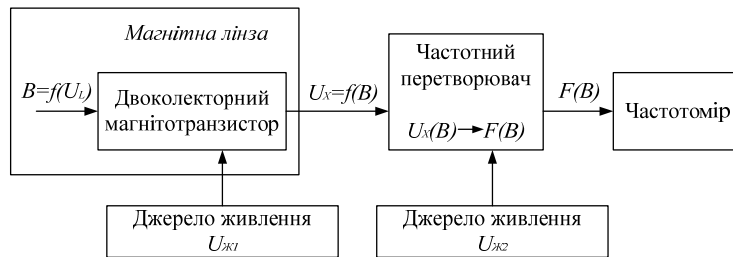


Рис. 3. Структурна схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля

Електрична схема розробленого радіовимірювального частотного перетворювача для вимірювання напруженості магнітного поля наведено на рис. 4.

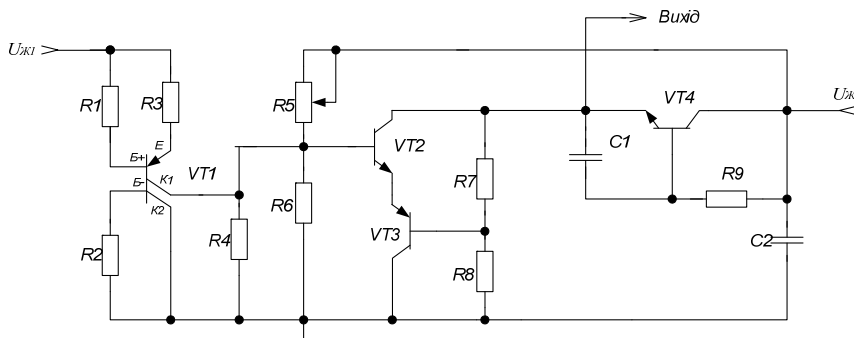


Рис. 4. Електрична схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля

В якості датчика магнітного поля використовується ДКБМТ  $VT1$ . Транзистори  $VT2, VT3, VT4$

виконані за інтегральною технологією і представлені мікросхемою HFA4094.

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 [4].

Принцип роботи радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним вихідним сигналом базується на зміні частоти генерації перетворювача в залежності від зміни рівня інформативного сигналу (який залежить від напруженості вимірюваного магнітного поля) з двоколекторного магнітотранзистора. Чим вища напруженість магнітного поля, тим більша зміна частоти генерації вихідного коливання у радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом [5].

### Експериментальне дослідження радіовимірювального магнітного перетворювача

За результатами експериментальних досліджень було побудовано (функції перетворення) графіки залежності частоти генерації від напруженості магнітного поля рис. 5 при різних напругах керування

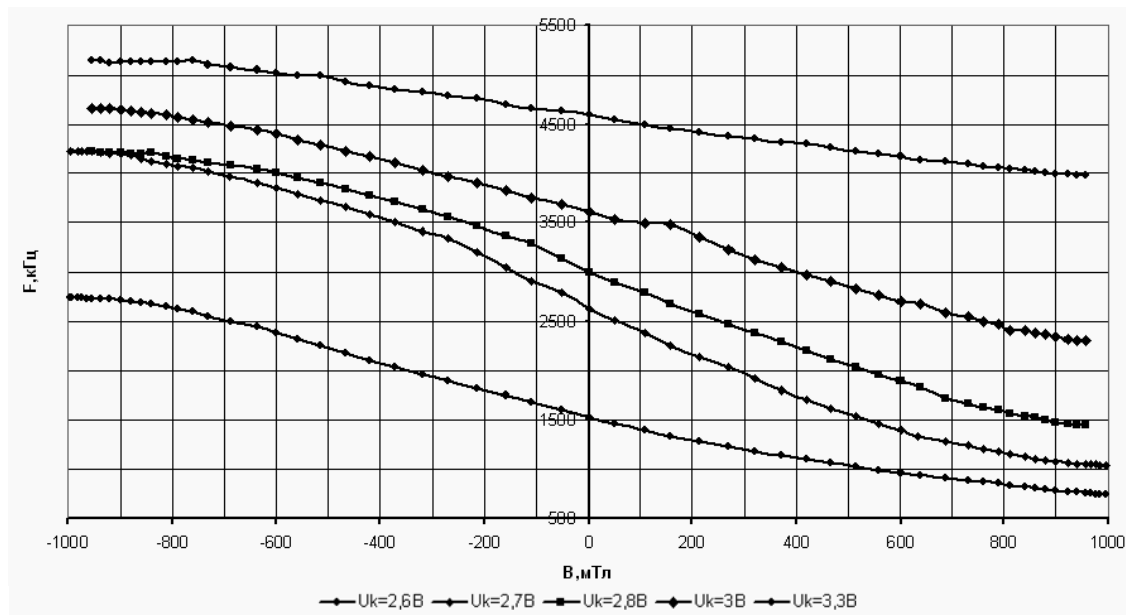


Рис. 5. Залежність частоти генерації радіовимірювального перетворювача від напруженості магнітного поля

При зростанні напруги керування зростає частота генерації при відсутності магнітного поля (діє лише магнітне поле Землі). При напрузі керування  $U_K = 2,6 В$  чутливість приладу в області дії від'ємного магнітного поля більша ніж при дії додатного магнітного поля. Подальше збільшення напруги керування до 2,8 В сприяє збільшенню чутливості радіовимірювального перетворювача. І при напрузі керування  $U_K = 2,8 В$  спостерігаємо найбільшу чутливість радіовимірювального перетворювача до дії магнітного поля. Також при цій напрузі керування чутливість як до дії додатного так і від'ємного магнітного поля є майже однаковою. При подальшому збільшенні напруги керування, чутливість радіовимірювального перетворювача до магнітного поля (як додатного так і від'ємного) зменшується, але зростає нульова (при відсутності магнітного поля) частота вимірювання. І як видно з графіків найбільша чутливість (досягається) при напрузі керування  $U_K = 2,8 В$  спостерігається до магнітного поля яке змінюється в межах:  $-700 мТл \dots +700 мТл$ .

Використовуючи експериментальні табличні дані та програми TableCurve2D визначено аналітичний опис функції перетворення радіовимірювального перетворювача.

Найбільш оптимальною є функція перетворення яка має наступний вигляд

$$F(B) = a + \frac{b}{\left[ 1 + \exp\left( \frac{-B - d * \ln(2^{1/g} - 1) - c}{d} \right) \right]^2}, \quad (7)$$

де невідомі коефіцієнти мають наступні величини:  $a=4334,78$ ;  $b=-3483,43$ ;  $c=206,856$ ;  $d= 540,374$ ;  $g=2,374$ .

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  $U_K = 2,8B$  (рис. 6).

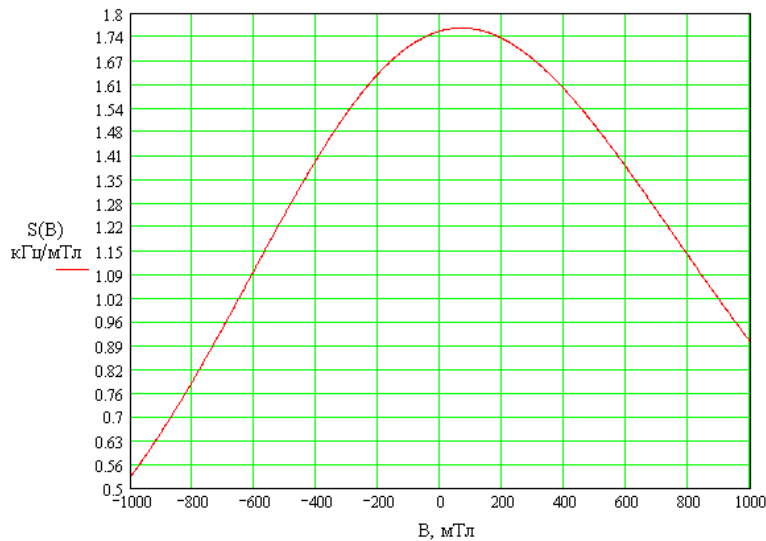


Рис. 6. Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача від напруженості магнітного поля

Графік чутливості радіовимірювального перетворювача (рис. 6) має різну крутість для додатного та від'ємного магнітних полів. Наприклад, для напруженості магнітного поля  $B=-1000$  мТл чутливість становить близько  $S=0,53$  кГц/мТл, а при напруженості магнітного поля  $B=1000$  мТл чутливість становить близько  $S=0,90$  кГц/мТл. Це пов'язано з тим, що в магнітотранзисторі що використовується, основними носіями є дірки. А при зміні полярності магнітного поля починають електрони (яких менше і які є неосновними носіями) помітно впливати на вихідну напругу датчика. Найбільша чутливість спостерігається в діапазоні додатного магнітного поля, напруженість якого змінюється в межах 20–100 мТл.

#### Висновки

В статті досліджено виникнення інформативних сигналів у двоколекторному магнітотранзисторі під час впливу на нього магнітного поля. Розроблено структурну та електричну схему радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом.

Експериментально встановлено, що максимальна чутливість радіовимірювального перетворювача становить 1,76 кГц/мТл. При цьому, відносна похибка перетворювача не перевищує  $\pm 0,5\%$ . При зміні напруженості магнітного поля в діапазоні -700 мТл ... 700 мТл досягнуто зміни частоти вихідного сигналу в діапазоні 1700 кГц ... 4000 кГц. Таким чином, значна зміна вихідної частоти радіовимірювального перетворювача дозволить точніше вимірювати напруженість магнітного поля досліджуваним перетворювачем.

#### Література

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : в 3 т. Т. 3. / З. Ю. Готра. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
2. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом : [монографія.] / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 254 с.
3. Igor V. Minin. Microsensors / Igor V. Minin, Oleg V. Minin – India, Croatia: InTech, 2011. 306 p.
4. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 302 с.
5. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : [монографія.] / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, А.О. Семенов, К.О. Коваль. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 336 с.

#### References

1. Gotra Z.U. Microelectronni sensory fizychnykh velychyn: v 3 t. T.3 / Z.U. Gotra – Lviv: Liga-Pres, 2002. – 475 p.
2. Osadchuk V.S. Microelectronic sensors magnetic field with frequency output [Monograph.]. V.S. Osadchuk, O.V. Osadchuk - Vinnytsia: VNTU, 2013. - 254 p.
3. Igor V. Minin. Microsensors / . Igor V. Minin, Oleg V. Minin – India, Croatia: InTech, 2011. - 306 p.
4. Osadchuk O.V. Microelectronic frequency converters based on transistor structures with negative resistance / O.V. Osadchuk - Vinnytsia: Universum, Vinnytsia, 2000. - 302 p.
5. Osadchuk V. S. Functional units of radio devices based on reactive properties of transistor structures with negative resistance: [Monograph.] / O.V. Osadchuk, A.O. Semenov, K.O. Koval - Vinnytsia: VNTU, 2011. - 336 p.

Рецензія/Peer review : 12.2.2015 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.  
Рецензент: д. т. н., проф. Кичак В. М.