

УДК 621.317.365

ВИКОРИСТАННЯ ТОНКИХ МАГНІТНИХ ПЛІВОК У ВИМІРЮВАЛЬНИХ МАГНІТОРЕЗИСТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

А. І. Витяганець

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: vytiaganets@ukr.net

Описано принцип роботи і особливості схемотехнічної реалізації вимірювального магніторезистивного перетворювача активної потужності. Показано, що вимірювальний перетворювач активної потужності є лінійним параметричним детектором. При створенні ватметра перетворювач підключають до електричної мережі і розміщують у магнітному полі провідника зі струмом. Досліджено залежність оптимальних параметрів, закладених у магніторезистивний вимірювальний перетворювач енергії електромагнітного поля, від параметрів феромагнітних плівок. Проаналізовано вплив анізотропії магнітоопору і поля анізотропії на тензор сприйнятливості магніторезистивного перетворювача.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач, тонкі плівки, активна потужність.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

А. И. Вытяганец

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: vytiaganets@ukr.net

Описан принцип работы и особенности схемотехнической реализации измерительного магниторезистивного преобразователя активной мощности. Показано, что измерительный преобразователь активной мощности является линейным параметрическим детектором. При создании ваттметра, преобразователь подключают к электрической сети и размещают в магнитном поле проводника с током. Исследована зависимость оптимальных параметров заложенных в магниторезистивный измерительный преобразователь энергии электромагнитного поля от параметров ферромагнитных пленок. Проанализировано влияние анизотропии магнитосопротивления и поля анизотропии на тензор восприимчивости магниторезистивного преобразователя.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, тонкие пленки, активная мощность.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Найбільш перспективними засобами для вимірювання активної потужності є магніторезистивні перетворювачі електричної потужності, що базуються на гальваномагнітних явищах: аномальному ефекті Холла і анізотропії магнітоопору, яка виникає під впливом прикладеного зовнішнього змінного магнітного поля [1, 2].

Для визначення потенційних можливостей магніторезистивних перетворювачів, доцільності їх використання в тих чи інших пристроях необхідно знати граничні параметри перетворювачів. Характеристики перетворювачів у цілому визначаються як параметрами чутливого елемента, так і параметрами, що з'єднують перетворювач з вимірювальними або підсилювальними пристроями. Як правило ці додаткові кола погіршують характеристики перетворювачів, тому необхідно розглянути параметри перетворювача, які обмежуються тільки параметрами феромагнітної плівки.

Метою роботи є дослідження впливу параметрів тонких феромагнітних плівок на характеристики магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Магніторезистивний перетворювач, оснований на гальваномагнітних явищах у феромагнітних плівках, типу аномального ефекту Холла і анізотропії магнітоопору має два незалежних входи:

електричний вхід пов'язаний з електричним полем у лінії передачі, або з напругою, прикладеною до перетворювача $U(E(t))$;

магнітний вхід, який пов'язаний з магнітним полем лінії передачі або зі струмом, який протікає у схемі $h(I(t))$. Сигнал параметричного множення пропорційний добутку електричної і магнітної складових поля з урахуванням зсуву фаз між ними та знімається з кінців магніторезистора:

$$U_0 = k_p U(E(t))h(I(t))\cos\varphi_{UI}, \quad (1)$$

де k_p – коефіцієнт перетворення.

Це дозволяє використовувати магніторезистивні перетворювачі для вимірювання активної потужності незалежно від фазових співвідношень у лінії передачі з неузгодженим навантаженням.

Зовнішнє незалежне джерело створює струм, що протікає у магніторезистивному перетворювачі, який, в свою чергу, викликає на виході структури різницю потенціалів (джерело постійної напруги), пов'язану зі струмом і магнітним полем у лінії передачі. На виході перетворювача знімаємо продетектований вихідний сигнал.

Магніторезистивний перетворювач видає постійну напругу детектування (від одиниць мікрвольт до одиниць мілівольт), а постійні складові вхідного сигналу мають великий рівень і вносять значні похибки. Тому, вхідну напругу подають через RC -коло з великими ємностями на низьких частотах, яке унеможливує передачу постійної складової, безпосередньо на вхід перетворювача. До чутливого елемента перетворювача можна прикладати не більше 60 В, для більших напруг потрібен подільник напру-

ги. При цьому слід витримати необхідні фазові співвідношення у лінії передачі. Двошарова структура магніторезистивного перетворювача становить дво-провідну лінію передачі, показано на рис. 1, 2.

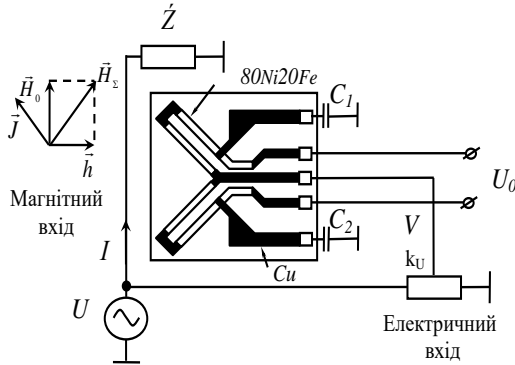


Рисунок 1 – Електрична схема ввімкнення магніторезистивного перетворювача активної потужності

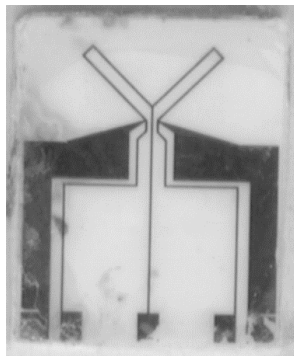


Рисунок 2 – Топологія магніторезистивного перетворювача

Чутливий елемент з розмірами 7X5X0,6 мм магніторезистивного перетворювача складається з двох симетричних петлеподібних ортогональних гілок, елементи яких з'єднані послідовно, що виготовлені електронним напилюванням магніторезистивного (80Ni20Fe) і провідникового (Cu) матеріалів на діелектричну підкладку з наступним багатошаровим процесом мікролітографії. По краях магніторезисторів повинен бути менший опір, для того щоб не було процесу детектування, коли протікає струм, що може збільшити додаткову похибку при вимірюванні активної потужності. Саме тому в цій частині магніторезисторів мідь накриває пермалой по кінцям. Плівка, якщо виготовлена неоднорідно, є квадратичним детектором струму і може детектувати зовнішнє магнітне поле. Структура повинна бути обов'язково симетричною, розміри при виготовленні мало впливають на точність вимірювання потужності. Чим ширша петля (ширина смужок), тим більша індуктивність зв'язку і навпаки, чим ближче вони зв'язані, тим більшою є паразитна ємність, тому при виготовленні важливо забезпечити компроміс.

В електричному колі, утвореному двома гілками перетворювача, протікає струм, який збуджує в плівці електричне поле \vec{E}_0 , напрям якого перпендикулярний щільності струму \vec{J} , а також вектору намагніченості \vec{M}_0 (рис. 1).

Кожна гілка чутливого елементу перетворювача має дві послідовно з'єднані смужки, розміщені на відстані 0,3 мм одна від одної, кожна з яких має такі параметри: електричний опір $R_m = 554 \text{ Ом}$, анізотропія магнітоопору $\Delta\rho/\rho = 1,53\%$, довжина 1,4 мм, ширина 30 мкм. Мідна смужка має ширину 30 мкм. Товщина феромагнітного і мідного шарів відповідно 60 і 500 нм.

При параметричному детектуванні присутній зовнішній вплив на пристрій:

$$U_0 = I(t)R(t) + U_{II}, \quad (2)$$

де $R(t)$ – опір, який для магніторезистивного перетворювача залежить від напруженості магнітного поля $h(t)$; U_{II} – паразитна напруга.

Задля параметричного детектування в магніторезистивному перетворювачі повинні бути різні фазові співвідношення між струмом, який детектує, і магнітним полем, яке цей струм створює. Оскільки параметри феромагнітної плівки дуже слабо змінюються під дією зовнішнього змінного магнітного поля, перетворювач працюватиме як лінійний параметричний детектор (рис. 3, 4).

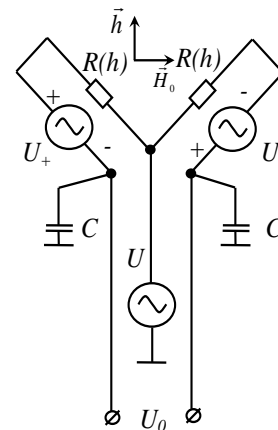


Рисунок 3 – Робота параметричного детектора на основі феромагнітної плівки

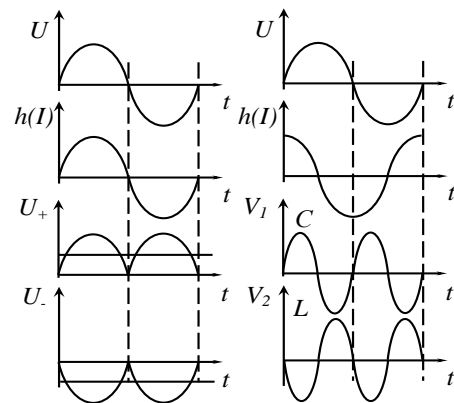


Рисунок 4 – Осцилограми напруг

Постійна складова продетектованого сигналу пропорційна потужності:

$$U_0 = k_p U h(I), \quad (3)$$

де k_p – коефіцієнт перетворення.

Окрім того, магніторезистивний перетворювач можна використовувати при дослідженні характеру навантаження в лінії передачі: індуктивного чи ємнісного, оскільки при перемноженні вхідних сигналів усі фази враховуються.

На рис. 5 показано постійний самарій-кобальтовий магніт, що використовується для створення зовнішнього магнітного поля зміщення H_0 , яке має величину кілька десятків тисяч А/м і прикладається для намагнічування магніторезистивної структури у потрібному напрямку і введення резонансу. По провіднику протікає струм активної потужності, яка вимірюється в лінії передачі, створюючи при цьому змінне магнітне поле h .

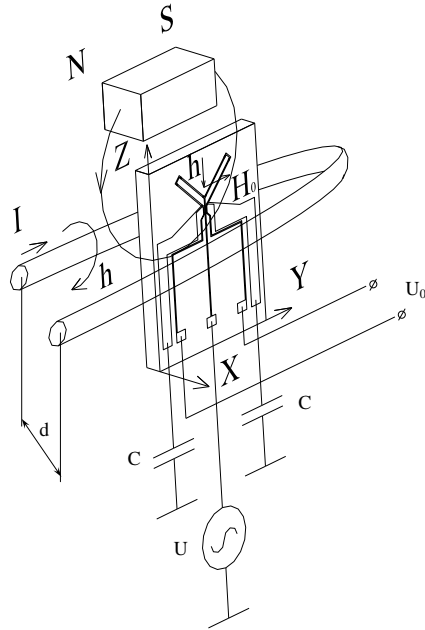


Рисунок 5 – Просторовий вигляд магніторезистивного перетворювача

Для середнього і високого рівнів потужності необхідно використовувати мілівольтметр, а для низьких рівнів потужності – нановольтметр.

Магніторезистивний перетворювач реагує як на електричну, так і на магнітну складову електромагнітного поля, корисний сигнал якого пропорційний їх добутку:

$$E_{0i} = 0,5 \operatorname{Re}(\kappa_{ipl} h_l J_p^*), \quad (4)$$

де J_p – компонента щільності електричного струму в плівці; h_l – компонента напруженості зовнішнього магнітного поля; κ_{ipl} – компоненти тензора магніторезистивної сприйнятливості; $i, p = 1, 2(x_1, x_2)$; $l = 1, 2, 3(x_1, x_2, x_3)$.

У перетворювачах на основі гальваноманітних явищ у феромагнітних плівках корисний сигнал визначається ефектом параметричного перетворення електромагнітного поля у провідному середовищі, тензор питомого опору якого [2, 3] змінюється відповідно до зміни намагніченості плівки під дією магнітного поля у присутності постійного магнітного поля насичення:

$$\Delta \rho_{ip} = \kappa_{ipl} h_l, \quad (5)$$

де $\Delta \rho_{ip}$ – компоненти тензора питомого опору.

У перетворювачах використовуються провідні феромагнітні плівки товщиною 20...40 нм. Оскільки

плівки металеві, то величина їх термоелектрорушійної сили маленька й її можна усунути вибором відповідних з'єднувальних провідників, які, окрім того, не утворюють випрямляючих контактів, як це має місце у напівпровідниках. Лінійність вольт-амперної характеристики провідних плівок спостерігається аж до їх електричного руйнування.

При збудженні намагніченої до насичення феромагнітної плівки електромагнітним полем середне за період значення напруженості електричного поля у плівці буде відрізнятися від нуля. Це пов'язано з тим, що феромагнітна плівка є параметричним детектором, змінний параметр якого – тензор питомого опору – змінюється відповідно до зміни намагніченості [4].

Перестроювання перетворювача у діапазоні частот можна здійснювати електричним шляхом за рахунок зміни напруженості підмагнічуючого поля, що відповідає області феромагнітного резонансу плівки.

При роботі перетворювача в області слабких підмагнічуючих полів нижня межа робочого діапазону частот необмежена, і тому перетворювачі можуть бути використані для індикації і вимірювання активної потужності в колах промислової частоти. Верхня межа частотного діапазону в цьому режимі обмежена частотою природного феромагнітного резонансу, яка для пермалоевих феромагнітних плівок знаходиться в діапазоні сотень мегагерц.

До оптимальних параметрів чутливих елементів магніторезистивних перетворювачів належать:

1. Коефіцієнт перетворення електричного і магнітного полів – $(2...10) \cdot 10^{-2}$ мВ/мВт.
2. Максимально допустима потужність розсіювання – 100 мВт.
3. Швидкодія – 10^{-9} с.
4. Динамічний діапазон сигналів, які перетворюються, – 30...35 дБ.
5. Енергетична ефективність перетворювача:

$$\eta = \frac{P_{ex} - P_{вих}}{P_{вих}} = \frac{V - U_0}{U_0}, \quad (6)$$

де P_{ex} , $P_{вих}$ – відповідно вхідна і вихідна потужності; V , U_0 – відповідно вхідна і вихідна напруги.

6. Чутливість перетворювача 25,9 мВ/Вт.
7. Еквівалентна шумова потужність – 10^{-8} Вт/Гц^{-1/2}.
8. Внутрішній опір 1,1 кОм.
9. Частотний діапазон від нуля герц до сотень мегагерц.

У феромагнітних тонких плівках існує пряма обмінна взаємодія, де сусідні атоми (спіни) розташовані паралельно. Феромагнетикам властиве явище спонтанного намагнічування, завдяки якому диполі, навіть за відсутності зовнішнього магнітного поля, прагнуть вишикуватися паралельно один одному в тому самому напрямку. Напрямок орієнтації диполів постійний тільки в межах домену.

У антиферомагнітних тонких плівках, на відміну від феромагнітних, існує непряма обмінна взаємодія, де сусідні спіни прагнуть вишикуватися в протилежних напрямках (антипаралельно). Ці плівки потребують для намагнічування зовнішнього магнітного поля.

Експериментально встановлено, що для феромагнітних плівок відносна зміна опору, яка залежить від напрямку орієнтації доменів, під дією магнітного поля в звичайних умовах складає величину порядку 10^{-2} [5].

До тонких феромагнітних плівок відносять шари металів та їх сплави (наприклад: Ni, Co, 80Ni20Fe, 70Co30Cu) товщиною менше 10 мкм [6].

При використанні тонких магнітних плівок у вимірювальних магніторезистивних перетворювачах активної потужності враховуються такі основні параметри феромагнітних (пермалоевих) плівок:

1. Питомий опір плівки: у різних плівках коливається у діапазоні десятки – сотні мкОм·см, для сплаву 80Ni20Fe $\rho = 62$ мкОм·см [7].

2. Коефіцієнт анізотропії магнітоопору:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{R(B)}{R(0)} \frac{1}{1 + \lambda^2 G_R B^2}, \quad (7)$$

де R – опір матеріалу плівки; λ – рухливість носіїв заряду; B – індукція магнітного поля; G_R – геометричний коефіцієнт.

Для феромагнітних плівок відносна зміна опору, яка залежить від напрямку орієнтації доменів, під дією зовнішнього змінного магнітного поля в звичайних умовах складає величину $\Delta\rho/\rho \approx 1-10\%$, для сплаву 80Ni20Fe $\Delta\rho/\rho = 1,5\%$ [8].

3. Намагніченість насичення: для сплаву 80Ni20Fe $M_0 = 8 \cdot 10^5$ А/м.

Для плівок, намагнічених до насичення (сотні тисяч А/м), відносна величина анізотропії магнітоопору дуже слабо залежить від напруженості магнітного поля аж до максимальних величин, які використовуються у техніці.

4. Поле одноосової наведеної магнітної анізотропії:

$$H_k = \frac{2k_1}{\mu_0 M_0}, \quad (8)$$

де k_1 – константа магнітної анізотропії.

Для сплаву 80Ni20Fe $H_k = 400$ А/м.

5. Коерцитивна сила магнітних плівок структури:

$$H_c \approx k \frac{\zeta \sigma}{I_0}, \quad (9)$$

де k – числова константа; σ – внутрішні напруження у плівці; I_0 – струм насичення; ζ – коефіцієнт магнітострикції.

Для тонких феромагнітних плівок цей параметр дорівнює одиниці – десятки А/м.

6. Магнітна сприйнятливості феромагнетик

$$m_i = \chi_{ip}^m h_p, \quad (10)$$

де χ_{ip} – компоненти тензора магнітної сприйнятливості; m_i , h_p – відповідно компоненти змінних намагніченості і напруженості магнітного поля; $i, p = 1, 2 (X_1, X_2)$.

Для тонких феромагнітних плівок цей параметр

порядку 1000 і більше [9].

7. Час встановлення коливань намагніченості у феромагнетик:

$$\tau = \frac{2}{\mu_0 \alpha \gamma (H_0 + M_0)}, \quad (11)$$

де μ_0 – магнітна постійна, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; α – постійна загасання; γ – модуль гіромагнітного відношення електрону, $\gamma = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг; H_0 – напруженість зовнішнього магнітного поля.

8. Метод виготовлення плівок: термічне напилення у вакуумі на слюдяну підкладку.

9. Товщина магнітної плівки: 20...40 нм.

10. Постійна загасання у плівці: 0,1...0,01.

11. Дисперсія осей легкого намагнічування.

12. Постійна аномального ефекту Холла, для нікелю при кімнатній температурі $-7,49 \cdot 10^{-16}$ Ом·м²/А [6].

Для плівок, намагнічених до насичення, відносна величина анізотропії магнітоопору дуже слабо залежить від напруженості магнітного поля аж до максимальних величин, які використовуються у техніці.

Для отримання максимального значення компонентів тензора магніторезистивної сприйнятливості необхідно використовувати плівки з найменшими значеннями дисперсії осей легкого намагнічування. Мінімальне значення дисперсії отримано для пермалоевих плівок складу 87Ni13Fe і складає величину 0,008727 радіан $\pm 0,5^\circ$ [10].

Під впливом магнітного поля в магніторезистивному перетворювачі проявляються нелінійні явища внаслідок нелінійної залежності компонентів тензора питомого опору від положення вектору намагніченості в феромагнітних плівках, а також нелінійної залежності між прикладеним полем і вектором намагніченості, унаслідок нелінійності рівняння Ландау–Лівшиця, яке їх пов'язує.

У перетворювачах, які працюють при підвищених рівнях потужності, необхідно використовувати більш тонкі плівки з пониженим значенням намагніченості насичення. Хоча зменшення товщини плівок призводить до погіршення їх однорідності, зменшення стабільності параметрів перетворювачів, а також і до зменшення допустимого рівня потужності розсіювання, що обмежує можливість зменшення товщини плівок.

Експериментально показано [7], що для товстих плівок складу 83Ni17Fe товщиною 200...300 нм нелінійності наступають у малих полях порядку 100...150 А/м, для тонких плівок товщиною 25...60 нм нелінійність наступала при 500...800 А/м.

У тонких плівках спостерігається тільки однорідна прецесія намагніченості, у той час як у товстих плівках має місце багатомодовий спектр поглинання.

Швидкодія чутливого елементу перетворювача визначається часом установлення коливань намагніченості, тобто постійною часу магнітного кола, яка для феромагнітних плівок складає величину порядку $2 \cdot 10^{-10}$ с.

ВИСНОВКИ. Розглянуто вплив параметрів тонких феромагнітних плівок на характеристики магні-

торезистивного вимірювального перетворювача активної потужності.

Збільшення точності перетворення, підвищення швидкодії, збільшення динамічного діапазону сигналів, які перетворюються, особливо в область підвищення рівнів потужності, ускладнення функціональних можливостей перетворювачів можливе за рахунок адекватного вибору тонких магнітних плівок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Витяганець А.І., Вунтесмері В.С. Засоби вимірювання активної потужності на низьких та середніх частотах «IN SITU» // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». – 2007. – Вип. 34. – С. 112–118.
2. Modern sensors. Handbook / A. Migeon, A. Lenel, S. Āad'o etc.; ed. P. Ripka, A. Tipka. – London: ISTE, 2007. – 518 p.
3. Tumanski S. Thin film magnetoresistive sensors. – CRC Press, 2001. – 576 p.

4. Magnetic sensors and magnetometers / Ed. P. Ripka. – Boston: Artech House, 2001. – 494 p.

5. Вунтесмері В.С., Витяганець А.І. Исследование частотной характеристики магниторезистивного измерительного преобразователя активной мощности низких частот // Известия вузов. Серия «Радиоэлектроника». – 2007. – № 12, т. 50. – С. 45–48.

6. Fiorillo F. Measurement and characterization of magnetic materials. – Amsterdam: Elsevier, 2004. – 648 p.

7. Buschow K.H.J., De Boer F.R. Physics of magnetism and magnetic materials. – New York: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 182 p.

8. Newnham R.E. Properties of materials: anisotropy, symmetry, structure. – Oxford: University Press, 2005. – 378 p.

9. Getzlaff M. Fundamentals of magnetism. – Berlin: Springer, 2008. – 388 p.

10. Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М. Многослойные тонкопленочные магниторезистивные элементы. – Тула: Институт проблем управления РАН, 2001. – 186 с.

USING A THIN MAGNETIC FILMS IN THE MEASURING MAGNETORESISTIVE CONVERTERS OF ACTIVE POWER

A. Vytiaganets

National Technical University of Ukraine "Kyiv Igor Sikorsky Polytechnic Institute"
prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: vytiaganets@ukr.net

Purpose. Investigation of the influence of the parameters of thin ferromagnetic films on the characteristics of the magnetoresistive measuring converter of active power. **Methodology.** The research methods are based on the apparatus of mathematical physics, numerical modeling of the structure of the sensitive element of the converter, circle theory methods in solving the non-linear Landau-Lifshitz equation, and the system of Maxwell differential equations. **Results.** The dependence of the optimal parameters of the magnetoresistive measuring converter of the energy of the electromagnetic field on the parameters of the ferromagnetic films is investigated. The influence of the anisotropy of the magnetoresistance $\Delta\rho$ and the anisotropy field H_k on the susceptibility tensor κ of the magnetoresistive converter is analyzed. **Originality.** The influence of the parameters of thin ferromagnetic films on the characteristics of the magnetoresistive measuring active power converter is considered. **Practical value.** Increasing the accuracy of the transformation, increasing the speed, increasing the dynamic range of signals that are converted, especially in the area of increase in power levels, the complexity of the functional capabilities of the converters is possible due to the adequate choice of thin magnetic films. References 10, figures 5.

Key words: Measuring transformer, thin film, active power.

REFERENCES

1. Vytiaganets, A.I., Vountesmeri, V.S. (2007), *Zasoby vymiryuvannya aktyvnoyi potuzhnosti na nyz'kykh ta serednikh chastotakh "IN SITU"* [Means of measuring active power at low and average frequencies "IN SITU"], *Bulletin of NTUU "KPI". series «Radio engineering. Radio equipment»*, no. 34, pp. 112–118.
2. Migeon, A., Lenel, A., Āad'o, S. etc. (2007), [Modern sensors. Handbook]; edition P. Ripka, A. Tipka, ISTE, London, Englian.
3. Tumanski, S. (2001), [Thin film magnetoresistive sensors], CRC Press.
4. Ed. Ripka, P. (2001), [Magnetic sensors and magnetometers], Artech House, Boston, USA.
5. Vountesmeri, V.S., Vytiaganets, A.I. (2007), Frequency response investigation of magnetoresistive low frequency active power measuring transducer, *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 50, pp. 680–682.

6. Fiorillo, F. (2004), [Measurement and characterization of magnetic materials], Elsevier, Amsterdam, Hollandian.

7. Buschow, K.H.J., De Boer F.R. (2003), [Physics of magnetism and magnetic materials], Kluwer Academic Publishers, New York, USA.

8. Newnham, R.E. (2005), [Properties of materials: anisotropy, symmetry, structure], Oxford University Press, England.

9. Getzlaff, M. (2008), [Fundamentals of magnetism], Springer, Berlin, Germany.

10. Kasatkin, S.I., Vasileva, N.P., Muravev, A.M. (2001), *Mnogosloynnye tonkoplenochnyie magnitorezistivnyie elementy* [Multilayer thin-film magnetoresistive], Institute for Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Tula, Russian.

Стаття надійшла 03.05.2017.