

# ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

---

УДК 621.317.42

## ПАРАМЕТРИ ІНДУКЦІЙНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ОБ'ЄКТІВ, СЕРЕДОВИЩ І СИСТЕМ

В. О. Нічога<sup>1</sup>, П. Б. Дуб<sup>2</sup>, Л. В. Ващишин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет “Львівська політехніка”;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

E-mail: nich@ipm.lviv.ua, dicma@ipm.lviv.ua

Сьогодні індукційні сенсори широко застосовують як у наукових, так і прикладних дослідженнях, що зумовлено їх простотою, високою чутливістю, можливістю функціонувати в широкому діапазоні частот та надійністю. Хоча вони давно відомі, роботи з їх удосконалення тривають, щоб поліпшити технічні характеристики, зменшити масу і розміри, застосувати нові феромагнітні матеріали. Проаналізовано модель, структурну схему та параметри індукційних сенсорів для вимірювання магнітного поля. Наведені основні розрахункові залежності для обчислення чутливості та порога чутливості індукційних сенсорів. Вказано шляхи мінімізації порога чутливості таких сенсорів, забезпечення певного типу амплітудно-частотної характеристики. Особливу увагу приділено сенсорам з плоскою амплітудно-частотною характеристикою, яку реалізують з допомогою від'ємного зворотного зв'язку по полю.

**Ключові слова:** *магнітне поле, індукційний сенсор, поріг чутливості.*

## PARAMETERS OF INDUCTION SENSORS FOR DIAGNOSTICS OF OBJECTS, MEDIA AND SYSTEMS

V. O. Nichoha<sup>1</sup>, P. B. Dub<sup>2</sup>, L. V. Vashchyshyn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lviv Polytechnic National University;

<sup>2</sup> Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

At present induction sensors are widely used both in scientific researches and for applied aims. That is caused by their simplicity, high sensitivity, wide frequency band, high reliability. Induction sensors are constantly improved to get better technical characteristics and low weight and dimensions. The model, block scheme and parameters of induction sensors for measuring magnetic fields are considered. The formulae for calculation of the main characteristics (sensitivity and threshold of sensitivity) are presented. Ways of the minimization of the threshold sensitivity and amplitude frequency characteristics formation are shown. A special attention is given to the sensors with flat amplitude-frequency characteristics that can be realized by using a negative field feedback.

**Keywords:** *magnetic field, induction sensor, threshold of sensitivity.*

Для вимірювання магнітних полів у прикладній геофізиці, бортових космічних експериментах, медико-біологічних дослідженнях, неруйнівному контролі та технічній діагностиці, в задачах електромагнітної сумісності і контролю побічного електромагнітного випромінювання приладів та систем найчастіше застосовують індукційні сенсори (ІС), які мають надзвичайно великий частотний діапазон ефективного застосування (від  $\sim 10^{-4}$  до  $\sim 10^6$  Гц) і дають можливість вимірювати магнітні поля в широкому динамічному діапазоні напруженості полів (від часток фТл до десятків Тл) [1–3].

© В. О. Нічога, П. Б. Дуб, Л. В. Ващишин, 2015

ІС, як правило, складаються з первинного перетворювача (ПП) магнітного поля і вхідного підсилювача (ВП) (рис. 1). При цьому тут застосовують первинні перетворювачі зі стержневим феромагнітним осердям – феромагнітні індукційні (ФІП) [1] або рамкові індукційні перетворювачі (РІП) [4].

Підвищений інтерес до ІС пов'язаний з їх простотою, високою чутливістю, можливістю роботи в широкому частотному діапазоні, надійністю, відсутністю допоміжних джерел живлення і пристроїв компенсації постійного поля Землі. На їх основі дуже просто створити компонентні сенсори, які дають максимальну інформацію про характеристики досліджуваних магнітних полів. Створені на основі ФІП і РІП компонентні сенсори технологічні та дешеві.

**Модель, структурна схема і чутливість ІС.** Сучасні індукційні сенсори можуть мати дуже великий діапазон вимірювань індукції, який залежить від розмірів, конструкції і матеріалу осердя сенсора, кількості витків котушки, частоти вимірюваного поля, точності вимірювання, схеми ввімкнення котушки до підсилювача, ефективності в узгодженні ПП сенсора і ВП підсилювача тощо.

Загалом дуже важко вказати якесь типове значення чутливості  $G$  ІС, оскільки вона залежить від низки параметрів ІС і, в першу чергу, частоти  $\omega$ , кількості витків  $w$ , довжини осердя  $l$ , діаметра осердя  $d$ , площі його поперечного перерізу  $S$ , ефективної магнітної проникності осердя  $\mu_b$ , а для ІС з ПП – від коефіцієнта підсилення  $K_u$ .

Чутливість самого ПП або ІС загалом визначає функція  $G(\omega)$  – відношення напруги на виході ПП  $U(\omega)$  до вимірюваної індукції  $B(\omega)$  або напруженості магнітного поля  $H(\omega)$  на заданій частоті  $\omega$ :

$$G_B(\omega) = \frac{U(\omega)}{B(\omega)}, \quad (1a)$$

$$G_H(\omega) = \frac{U(\omega)}{H(\omega)}, \quad (1b)$$

де  $G_B(\omega)$  і  $G_H(\omega)$  – чутливість ПП за індукцією і напруженістю поля відповідно.

Вирази (1a) і (1b) можна подати ще так:

$$G_B(\omega) = \omega w S \mu_b \quad \text{або} \quad G_H = \omega w S \mu_0 \mu_b,$$

де  $\mu_b = f(l/d)$  – ефективна магнітна проникність осердя [5, 6].

Математичну модель ІС у вигляді системи параметрів  $Z$  можна записати так:

$$Z = \left\langle B, \left\{ C_{STi} \right\}, U \right\rangle, \quad (2)$$

↑  $E_{STi}$

де  $B$  – індукція вимірюваного поля;  $U$  – напруга вимірюваного сигналу на виході ІС;  $C_{STi}$  – параметри середовища і каналу, в яких вимірюють магнітне поле;  $E_{STi}$  – просторово-часові завади та шуми в середовищі та каналі вимірювання.

Структурна схема ІС подана на рис. 1, де  $B(\omega)$  – індукція вимірюваного поля на частоті  $\omega$ ;  $U(\omega)$  – напруга на виході ІС на частоті  $\omega$ ;  $C_{ST1}$ ,  $C_{ST2}$  – параметри середовища і каналу вимірювання;  $E_{ST1}$ ,  $E_{ST2}$  – відповідно зовнішні завади і шуми середовища;  $E_{ST3}$ ,  $E_{ST4}$  – шуми ПП і ВП відповідно.

**Поріг чутливості ІС.** Одним із основних параметрів, за яким можна порівнювати сенсори для вимірювання магнітних полів, є поріг чутливості за магнітним полем  $B_{\min}$  або рівень густини еквівалентного шумового поля (*magnetic field*

noise) в смузі 1 Гц –  $\sqrt{W}$ . Ці параметри частотозалежні і на заданій частоті  $\omega$  визначаються залежністю

$$B_{\min}(\omega) = \sqrt{W} = \frac{\sqrt{\sum \bar{E}_{STi}^2}}{G(\omega)}. \quad (3)$$

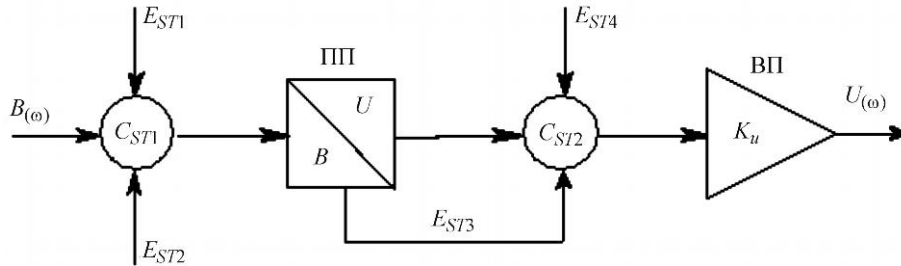


Рис. 1. Структурна схема індукційного сенсора.

За умови, що зовнішні завади відсутні ( $E_{ST1} = 0$ ), а шуми середовища малі проти шумів ПП і ВП ( $E_{ST2} \ll E_{ST3}$ ,  $E_{ST1} \ll E_{ST4}$ )

$$B_{\min}(\omega) = \frac{\sqrt{\bar{E}_{ST3}^2 + \bar{E}_{ST4}^2}}{G(\omega)}, \quad (4)$$

тобто тут поріг чутливості визначають тільки шуми ПП і ВП.

Фізичний зміст порога чутливості ІС – це таке значення вимірюваної індукції поля  $B_{\min}$ , за якого похибка вимірювання становить 100%, тобто за співвідношення сигнал/шум  $\xi = 1$  [6].

**Схеми ввімкнення і амплітудно-частотна характеристика ІС.** Схема ввімкнення ПП з ВП суттєво залежить від виду амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), яку необхідно реалізувати в ІС. Найпростіше розв'язують цю задачу під час вимірювання гармонічних магнітних полів, коли вигляд АЧХ не має важливого значення. Тоді ПП можна безпосередньо з'єднати з ВП. Схема ввімкнення такого ІС подана на рис. 2а. Тут  $H$  – напруженість вимірюваного магнітного поля;  $E_S$  – електрорушійна сила (е.р.с.) ІС;  $L$  – індуктивність котушки ІС;  $w$  – кількість витків його обмотки;  $r$  – опір втрат обмотки ІС;  $C_0$  – власна ємність обмотки ІС;  $R_0$  – опір втрат у ній;  $C_{in}$  і  $R_{in}$  – вхідна ємність і вхідний опір ВП;  $K_U$  – коефіцієнт підсилення ВП;  $U_S$  і  $U_n$  – відповідно напруга сигналу і шумів на виході ВП;  $e_n$  і  $i_n$  – відповідно шумова е.р.с. і шумовий струм ВП;  $\gamma$  – коефіцієнт кореляції між цими джерелами;  $E_{nr}$  – е.р.с. теплового шуму ІС;  $i_{nR_0}$  – шумовий струм опору втрат власної ємності ІС.

Напруга на виході ІС пропорційна похідній магнітної індукції вимірюваного поля. Тому відтворити форму сигналу найпростіше, коли АЧХ ІС частотонезалежна або лінійна функція частоти.

Під час вимірювання імпульсних магнітних полів зазвичай використовують ІС з лінійною частотною характеристикою, оскільки частотонезалежну АЧХ важко реалізувати в дуже широкому частотному діапазоні, який необхідний у цих випадках. Для реалізації лінійної АЧХ потрібний ВП, який можна побудувати на базі операційного підсилювача (ОП) з великим вхідним опором і з подачею сигналу на неінвертувальний вхід ОП. Щоб забезпечити критичний режим роботи, вхід такого підсилювача шунтують критичним резистором  $R_{кр}$ .

Частотонезалежну (“плоску”) АЧХ можна отримати, якщо ІС працює в режимі, близькому до короткого замикання. Це найпростіше здійснити, використовуючи у вхідному каскаді ВП операційний підсилювач з від’ємним зворотним зв’язком за напругою або за полем (рис. 2б), де  $L_{fb}$ ,  $w_{fb}$  – індуктивність і кількість витків обмотки зворотного зв’язку;  $R_{fb}$  – резистор зворотного зв’язку;  $E_{nR_{fb}}$  – шумова е.р.с. резистора зворотного зв’язку.

Встановили [7], що для схеми на рис. 2б, яку найчастіше вживають під час побудови низькопорогових ІС, вихідну напругу  $U_S$  можна подати виразом (вплив  $R_0$  нехтуємо)

$$\dot{U}_S = \frac{j\omega M \dot{H} K_U}{1 + \frac{r}{R_{in}} - \omega^2 L(C_0 + C_{in}) + j \left[ \frac{\omega L}{R_{in}} + r\omega(C_0 + C_{in}) + \frac{\omega L K_U w_{fb}}{R_{fb} w} \right]}. \quad (5)$$

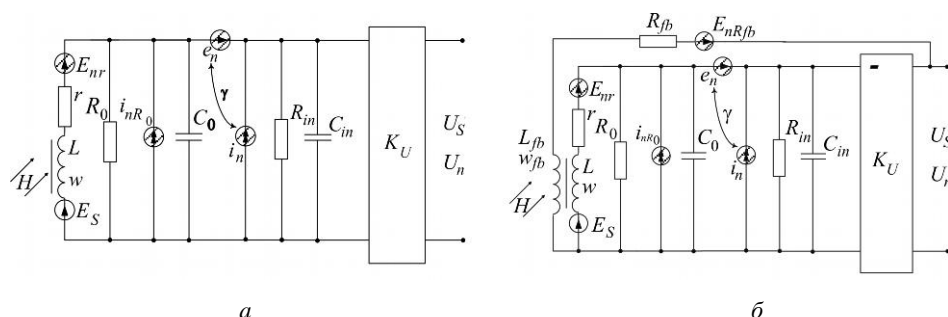


Рис. 2. Шумосигнальні схеми ІС з безпосереднім під’єднанням ПП до ВП (а) та зі зворотним зв’язком за полем (“плоска” АЧХ) (б).

Звідси можна отримати такі формули для визначення АЧХ і фазочастотної характеристики (ФЧХ) ІС:

$$G_H(\omega) = \mu_0 \mu_b S w K_U \omega \left\{ \left[ 1 + \frac{r}{R_{in}} - \omega^2 L(C_0 + C_{in}) \right]^2 + \left[ \frac{\omega L}{R_{in}} + r\omega(C_0 + C_{in}) + \frac{\omega L w_{fb} K_U}{R_{fb} w} \right]^2 \right\}^{-1/2}, \quad (6)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{1 + \frac{r}{R_{in}} - \omega^2 L(C_0 + C_{in})}{\frac{\omega L}{R_{in}} + r\omega(C_0 + C_{in}) + \frac{\omega L w_{fb} K_U}{R_{fb} w}}, \quad (7)$$

де  $\mu_b$  визначають за формулою [5, 8]

$$\mu_b = \frac{1,31(1 - 0,255 K_w^2) \mu}{1 + \frac{\ln 2 \lambda - 1}{\lambda^2} (\mu - 1)}, \quad (8)$$

тут  $\mu$  – відносна магнітна проникність матеріалу, з якого виготовлене осердя;  $\lambda = l/d$  – відносна довжина осердя;  $l$  – довжина осердя;  $d$  – його діаметр;

$K_w = l_w/l$  – відносна довжина котушки ІС;  $l_w$  – довжина обмотки ІС.

Якщо знехтувати коефіцієнт кореляції  $\gamma$  між  $e_n$  і  $i_n$  (що припустимо для більшості сучасних електронних підсилювальних пристроїв і, особливо, для польових транзисторів), то можна отримати такі вирази для визначення напруги вихідного шуму і порога чутливості ІС як функцій його електричних параметрів:

$$U_n(\omega) = K_U \left\{ 4kT \left( r + \frac{\omega^2 L^2 w_{fb}^2}{R_{fb} w^2} \right) + e_n^2 \left[ (1 - \omega^2 LC_0)^2 + r^2 \omega^2 C_0^2 \right] + i_n^2 \times (r^2 + \omega^2 L^2) \right\}^{1/2} \times \left\{ \left[ 1 + \frac{r}{R_{in}} - \omega^2 L (C_0 + C_{in}) \right]^2 + \left[ \frac{\omega L}{R_{in}} + r\omega (C_0 + C_{in}) + \frac{\omega L w_{fb} K_U}{R_{fb} w} \right]^2 \right\}^{-1/2}, \quad (9)$$

$$B_{\min} = \frac{1}{\omega \mu_b \mu_0 S w} \left\{ 4kT \left( r + \frac{\omega^2 L^2 w_{fb}^2}{R_{fb} w^2} \right) + e_n^2 \left[ (1 - \omega^2 LC_0)^2 + r^2 \omega^2 C_0^2 \right] + i_n^2 (r^2 + \omega^2 L^2) \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

Тут  $4kT \omega^2 L^2 w_{fb}^2 / (R_{fb} w^2)$  – спектральна густина е.р.с. теплового шуму резистора зворотного зв'язку, перерахована з кола обмотки цього зв'язку в коло основної обмотки ІС.

Аналізуючи вираз (6), можна сформулювати такі умови досягнення частотонезалежної характеристики ІС:

$$\omega L ? \frac{R_{fb} w}{w_{fb} K_U}, \quad \frac{\omega L R_{in}}{r} ? \frac{R_{fb} w}{w_{fb} K_U}, \quad \frac{1}{\omega (C_0 + C_{in})} ? \frac{R_{fb} w}{w_{fb} K_U}, \quad (11)$$

$$R_{in} ? \frac{R_{fb} w}{w_{fb} K_U}, \quad \frac{L}{r (C_0 + C_{in})} ? \frac{R_{fb} w}{w_{fb} K_U}.$$

За виконання цих умов АЧХ ІС на плоскій її частині визначає вираз:

$$G_H(\omega) = G = \frac{\mu_0 \mu_b S w^2 R_{fb}}{L w_{fb}} = \frac{M w R_{fb}}{L w_{fb}}. \quad (12)$$

З виразу (9) бачимо, що від параметрів кола від'ємного зворотного зв'язку залежить тільки другий член  $4kT \omega^2 L^2 w_{fb}^2 / (R_{fb} w^2)$ , який шляхом підбору  $R_{fb}$  і  $w_{fb}$  завжди можна звести до значення, яке можна знехтувати. Зменшити величину  $w_{fb}^2 / R_{fb}$  необхідно також, щоб отримати плоску (частотонезалежну) АЧХ.

Таким чином, у виразі (10) для  $B_{\min}$  завжди можна знехтувати шум  $R_{fb}$ . Отже, конструктивні параметри ПП можна вибирати з умови досягнення  $B_{\text{пор}}$  у заданому діапазоні частот, тобто параметри ПП можна вибрати, аналізуючи тільки шумову еквівалентну схему ПП і ВП (рис. 3а). З аналізу цієї схеми можна знайти поріг чутливості ІС за напруженістю магнітного поля  $H_{\min}$  або за його індукцією магнітного поля  $B_{\min}$ :

$$B_{\min} = \frac{1}{\omega \mu_b \mu_0 S w} \left\{ 4kTr + e_n^2 \left[ (1 - \omega^2 LC_0)^2 + r^2 \omega^2 C_0^2 \right] + i_n^2 (r^2 + \omega^2 L^2) \right\}^{1/2}. \quad (13)$$

Серед електричних параметрів ІС, що входять у вираз (13), тільки активний опір ПП на постійному струмі  $r_{\pm}$ , індуктивність  $L$  і е.р.с.  $E_S$  можна розрахувати з достатньою точністю. Отримати аналітичні залежності ємності  $C_0$ , повного опору втрат  $r$  (в який входить опір на постійному струмі  $r_{\pm}$ ), опору втрат у власній ємності ІС  $R_0$  і його шумового струму  $i_{nR_0}$  від конструктивних параметрів ІС поки що не вдається. Однак, ґрунтуючись на досвіді конструювання і розробки ІС, можна ввести деякі напівемпіричні коефіцієнти, які можна частково визначити за експериментальними даними. За цими коефіцієнтами можна хоча би наближено побудувати залежність електричних і шумових параметрів ІС від кількості витків і довжини осердя (або діаметра повітряної рамки для РПП), а також від частоти. У працях [9–11] розглядали один частковий випадок знаходження оптимальних параметрів ПП, що стосується розробки ІС для космічних досліджень, коли треба забезпечити мінімальний поріг чутливості за мінімальної маси. Для інших випадків такий підхід не придатний.

При цьому для повного опору втрат  $r$  необхідно враховувати відразу три його складові [10]: активний опір на постійному струмі  $r_{\pm}$ , втрати на гістерезис  $r_h$ , втрати на струми Фуко  $r_f$ . Шумові е.р.с.  $e_n$  і струм  $i_n$  ВП розглядають як корені квадратні зі спектральної густини відповідних шумових джерел і виражають тричленними частотозалежними виразами [10]:

$$e = e_0 \left[ 1 + (f / f_{e1})^{a_e} + (f / f_{e2})^2 \right], \quad (14)$$

$$i = i_0 \left[ 1 + (f / f_{i1})^{a_i} + (f / f_{i2})^2 \right], \quad (15)$$

де  $e_0, i_0, a_e, a_i, f_{e1}, f_{i1}, f_{e2}, f_{i2}$  знаходять, знявши частотні залежності джерел шуму.

Враховуючи сказане, еквівалентну шумову схему ІС на рис. 3а можна привести до схеми, поданої на рис. 3б.

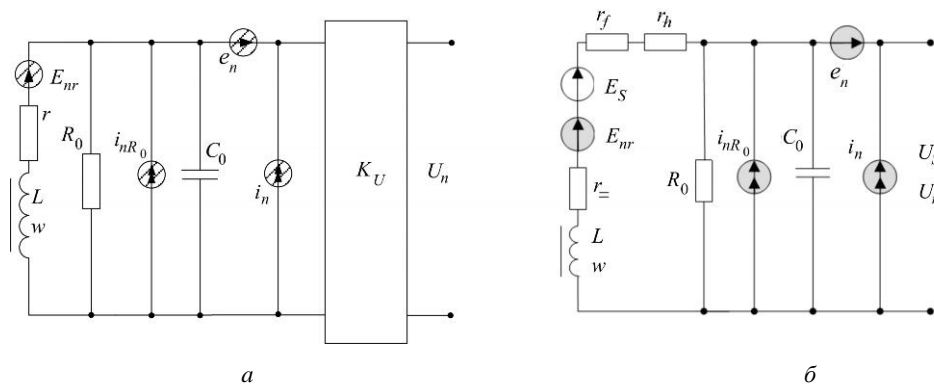


Рис. 3. Звичайна (а) і вдосконалена (б) шумові еквівалентні схеми ІС зі зворотним зв'язком за полем.

Схема на рис. 3б відрізняється від такої схеми на рис. 3а тим, що опір втрат  $r$  подано як суму трьох опорів  $r_{\pm}, r_f, r_h$ . Більшість параметрів, які входять в еквівалентну схему, можна отримати за результатами експериментальних і теоретичних досліджень, і вони є функціями кількості витків котушки сенсора  $w$ , довжини

осердя  $l$  і частоти  $\omega$ . При цьому, як показано в працях [6, 8, 9], параметри еквівалентної схеми (рис. 3б) можна визначити за напівемпіричними коефіцієнтами  $k_s$ ,  $k_L$ ,  $k_f$ ,  $k_R$ ,  $f_F$ ,  $Q_h$ ,  $Q_0$ , фізичний зміст яких і орієнтовні значення такі:  $k_s$ , В/(Тл·Гц·м<sup>2</sup>·вит) – чутливість на холостому ході ІС довжиною 1 м на частоті 1 Гц з одним витком, його значення в більшості практичних випадків становить  $1 \pm 20\%$ ;  $k_L$ , Гн/(м·вит<sup>2</sup>) – індуктивність такого ж ІС, типове значення  $2 \cdot 10^{-7} \pm 25\%$ ;  $k_f$ , Гц/(м<sup>0.5</sup>·вит) – частота резонансу такого ІС, типове значення  $4 \cdot 10^{-7} \pm 25\%$ ;  $k_R$ , Гц·м<sup>2</sup> – частота, за якої індуктивний і активний опори ІС однакові, типове значення  $0,5 \div 3,5$ ;  $f_F$ , Гц – частота, для якої добротність ІС, яку визначають струми Фуко, дорівнює 1; типове значення  $(5 \div 500) \cdot 10^3$ ;  $Q_h$  – добротність, яку визначають втрати на гістерезис в осерді, орієнтовне значення  $50 \div 200$ ;  $Q_0$  – добротність на частоті власного резонансу, яку визначають втрати в паразитних ємностях, орієнтовне значення  $3 \div 10$ .

Отже, деякі напівемпіричні коефіцієнти можуть змінюватися в досить великих межах, але більшість з них мало впливає на поріг чутливості ІС.

На основі вказаних коефіцієнтів можна записати такі параметри еквівалентної шумової схеми ІС (рис. 3б) [9–11]:

$$\begin{aligned} E_S &= k_s f w l^2 B, \quad L = k_L l w^2, \quad r_f = 2\pi k_L l w^2 f^2 / f_F, \quad r_h = 2\pi f k_L l w^2 / Q_h, \\ r_{\pm} &= 2\pi k_R k_L l w^2 / l, \quad E_{nr} = \sqrt{4kT(r_{\pm} + r_h + r_f)\Delta f}, \quad R_0 = 2\pi Q_0 k_f k_L w \sqrt{l}, \\ i_{nR_0} &= \sqrt{4kT\Delta f / R_0}, \quad C = (4\pi^2 k_f^2 k_L)^{-1}. \end{aligned} \quad (16)$$

Враховуючи ці параметри, можна записати вираз для порога чутливості за індукцією ІС як функцію частоти, кількості витків обмотки, довжини осердя:

$$\begin{aligned} B_{\text{пор}} &= \frac{\sqrt{\Delta f}}{k_s f w l^2} \left\{ 4kT \cdot 2\pi k_L w^2 l f \cdot \left( \frac{k_R}{f l^2} + \frac{1}{Q_h} + \frac{f}{f_F} \right) + \left( i_n^2 + \frac{2kT}{\pi Q_0 k_f k_L w \sqrt{l}} \right) \times \right. \\ &\quad \times 4\pi^2 f^2 k_L^2 l^2 w^4 \left[ 1 + \left( \frac{k_R}{f l^2} + \frac{1}{Q_h} + \frac{f}{f_F} \right)^2 \right] + e_n^2 \times \\ &\quad \times \left[ \left[ 1 + \frac{w f \sqrt{l}}{Q_0 k_f} \left( \frac{k_R}{f l^2} + \frac{1}{Q_h} + \frac{f}{f_F} \right) - \frac{l w^2 f^2}{k_f^2} \right] + \frac{f^2 w^2 l}{k_f^2} \right] \times \\ &\quad \left. \times \left[ \frac{1}{Q_0} + \frac{w \sqrt{l} f}{k_f} \left( \frac{k_R}{f l^2} + \frac{1}{Q_h} + \frac{f}{f_F} \right) \right]^2 \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Звідси можна знайти оптимальну кількість витків  $w$ . Якщо потрібно мінімізувати поріг чутливості на одній певній частоті, то  $w$  можна знайти з рівняння  $\partial B_{\text{пор}} / \partial w = 0$ , яке для виразу (17) є рівнянням четвертого степеня відносно  $w$ , корені якого можна виразити через його коефіцієнти згідно з відомими формулами, але простіше це зробити числовими методами. Крім того, здебільшого необхідно забезпечити певний рівень порога чутливості в широкому діапазоні частот, а в такому випадку оптимізувати кількість витків можна тільки за графіками залежності  $B_{\text{пор}}$  від  $w$ . Слід також зауважити, що вибране значення  $w$  треба перевірити на забезпечення виконання вимог (11).

## ВИСНОВКИ

Проаналізовані сучасні підходи до аналізу схем ввімкнення і параметрів індукційних сенсорів, які забезпечують плоску АЧХ. Виявлено, що оптимальною схемою ввімкнення ІС для мінімізації порога чутливості та забезпечення “плоскої” АЧХ є схема з від’ємним зворотним зв’язком за полем.

1. *Ничога В. А.* Измерение весьма слабых низкочастотных магнитных полей в геофизических и космических исследованиях // Отбор и передача информации. – 1993. – Вып. 9. – С. 70–77.
2. *Проненко В. О., Корепанов В. С.* Особливості проектування індукційних магнітометрів // Геофиз. журн. – 2011. – № 4. – С. 127–133.
3. *Nichoga V., Gontar I., Dub P.* Three-component Wide-band Low-frequency Magnetic Antenna for Diagnostics of Magnetic Fields in Outboard Space // Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Telecommunications in Modem Satellite, Cable and Broadcasting Service (TELSIKS’2001). – Niš. – Vol. 2. – P. 657–660.
4. *Ничога В. О.* Тенденції розвитку та побудови сенсорів магнітних і механічних величин сучасних інформаційно-вимірювальних систем // Відбір і обробка інформації. – 2001. – Вып. 15 (91). – С. 112–122.
5. *Мизюк Л. Я., Ничога В. А.* Электрические параметры индукционных низкочастотных магнитоприемников с ферромагнитными сердечниками // Геофиз. приборостроение. – 1964. – Вып. 20. – С. 37–61.
6. *Ничога В. А.* Шумовые параметры элементов входной цепи с индукционным магнитоприемником // Геофиз. аппаратура. – 1977. – Вып. 60. – С. 94–104.
7. *Nichoga V., Dub P.* Measuring Sensors for Investigation of Magnetic Field on the Board of Space Apparatuses // Proc. Fourteenth Int. Wrocław Symp. and Exhibition on Electromagnetic Compatibility. – Wrocław, 1998. – P.124–130.
8. *Amorphous Ferromagnetic Alloys in Modern Inductive Sensors of Alternating Magnetic Fields / V. Nichoga, O. Sokol-Kutylovskij, P. Dub, L. Sopilnyk* // Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Microelectronics Technologies and Microsystems. – Kosice, 1999. – P. 95–102.
9. *Advanced Field Magnetometers Comparative Study / V. Korepanov, R. Berkman, L. Rakhlin et al.* // Measurements. – 2001. – 29, № 1. – P. 137–146.
10. *Berkman J.* Low Weight Wide Band Search-coil Magnetometers // Proc. V Symp. of Magnetic Measurements. – Kielce, 1997. – P. 45–52.
11. *Korepanov V., Berkman R.* New Approach to the Exact Design of Low-noise Coil Magnetometers // Proc. XIV IMECO World Congress. New Measurements. – Finland, 1997. – P. 103–108.

Одержано 08.05.2015