

# Особливості проектування індукційних магнітометрів

© В. О. Проненко, В. Є. Корепанов, 2011

Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН та НКА України, Львів, Україна  
Надійшла 3 серпня 2010 р.

Представлено членом редколегії С. Н. Куліком

Индукционные магнитометры (ИМ) широко используются во многих отраслях науки и промышленности, в том числе в полевой геофизике. Частотный и динамический диапазоны ИМ, по всей вероятности, наиболее широкие из всех существующих магнитометров: они используются для измерения изменений магнитного поля в диапазоне частот от  $\sim 10^{-4}$  до  $\sim 10^6$  Гц с индукцией от долей фемтотесла до десятков тесла. Это объясняет постоянный интерес к попыткам создания ИМ с наилучшими параметрами. Настоящая работа посвящена особенностям построения ИМ с оптимальным набором параметров.

Induction or search-coil magnetometers (IM) are widely used in many branches of science and industry, including field geophysics. The frequency range and dynamic range of IM are probably the widest of all existing magnetometers: they are used for the measurement of magnetic field variations in the frequency band from  $\sim 10^{-4}$  till  $\sim 10^6$  Hz with the intensities from fractions of femtotesla till tens of tesla. This explains the permanent interest to IM design and the attempts to construct the IMs with the best possible parameters. The IM with optimal parameters set design peculiarities are described.

**Вступ.** Індукційні магнітометри (ІМ) широко використовують для експериментальних досліджень природних і штучних магнітних полів у діапазоні частот від  $\sim 10^{-4}$  до  $\sim 10^6$  Гц і вище з науковою і та технічною метою в наземних й космічних умовах. Це, можливо, найпоширеніші пристрої для дослідження магнітного поля. Зазвичай різні сфери застосування накладають різні вимоги до головних параметрів ІМ. Наприклад, польова геофізика потребує якнайменший рівень магнітних шумів (РШ) ІМ, а такі параметри, як довжина, маса й споживана потужність, є вторинні. Космічні дослідження до вимоги якнайменшого РШ додають вимогу мінімізації маси й споживаної потужності. Деякі спеціальні типи ІМ потребують дуже малих розмірів і споживаної потужності поряд з якнайменшим РШ. Це показує, що, незалежно від інших вимог, якнайменший РШ залишається найважливішою вимогою, і за інших близьких параметрів його можна використовувати для порівняння якості ІМ.

Незважаючи на те що ІМ застосовують, імовірно, понад двох століть, інтерес до них та їхніх конструктивних особливостей все ще перебуває на досить високому рівні, про що свідчить значна кількість публікацій за останні роки.

Краща із знайдених західних робіт [Dehmel, 1989], присвячена проектуванню ІМ, приді-

ляє велику увагу дизайну датчика (котушка і осердя) і дуже мало уваги звертає на основну проблему в цій галузі — шумове узгодження датчика й підсилювача, що є принциповим питанням для отримання низького РШ ІМ [Мизюк, 1964; Вакульский и др., 1985]. У пізніших публікаціях [Ripka, 2001; Tumanski, 2007] цією проблемою нехтують повністю або замінюють «інтуїтивним» рішенням [Coillot et al., 2007] чи дуже своєрідним розумінням оптимізації [Papegno, Grosz, 2009]. Підкреслимо, що для створення ІМ з мінімально можливим РШ тільки комплексний підхід до оптимізації системи датчик—підсилювач, залежно від обраного критерію — маса або довжина, — може дати найліпший результат.

**Принцип дії ІМ.** Передавальну функцію ІМ визначають за законом Фарадея:

$$u = -n \frac{d\Phi}{dt},$$

де  $u$  — напруга, індукована в котушці з кількістю витків  $n$ ;  $\Phi$  — магнітний потік.

Приймають, що потік  $\Phi$  змінюється синусоїдально і спрямований уздовж поздовжньої осі осердя:  $\Phi = \Phi_{\max} \cos(\omega t)$ , де  $\omega$  — колова частота. Тоді амплітудне значення вихідної напруги котушки з осердям з високою проникністю може бути подано в такий спосіб:

$$U_0 = \omega n \Phi_{\max} = \omega n S \mu_0 \mu_c H_e = G H_e, \quad (1)$$

де  $\mu_0$  — магнітна проникність вакууму;  $\mu_c$  — відносна магнітна проникність осердя;  $S$  — поперечний переріз осердя;  $H_e$  — амплітудне значення зовнішньої вимірюваної напруженості магнітного поля;  $G$  — чутливість ІМ.

Згідно з (1), в ідеальному випадку вихідний сигнал котушки має залежати лінійно від частоти ( $U_{0id}$  на рис. 1). Проте через наявність паразитної ємності  $C$ , яка формує з індуктивністю котушки  $L$  коливальне коло з добротністю  $Q$ , залежність  $U_0=f(\omega)$  або  $U_0(f)$  складніша. Типова амплітудно-частотна залежність котушки індуктивності подана на рис. 1 суцільною лінією. Видно, що вираз (1) дійсний тільки для діапазону частот, нижчих від частоти резонансу.

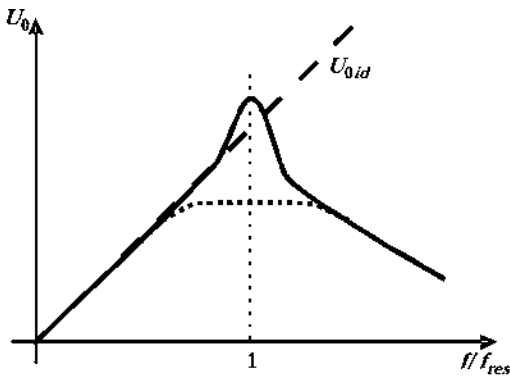


Рис. 1. Суцільна лінія — амплітудно-частотна характеристика вихідної напруги  $U_0$  в резонансному режимі ( $f_{res}$  — частота резонансу); штрихова лінія — ідеальна форма цієї характеристики без урахування резонансу; пунктир — типова частотна характеристика ІМ.

ІМ можна використовувати у резонансному режимі з передавальною функцією, що показана суцільною лінією на рис. 1, для досліджень магнітного поля, якщо вимірюваний частотний діапазон є дуже вузьким, або в разі роботи у часовій ділянці на частотах, нижчих від частоти резонансу. Втім для вимірювання сигналів з широкими складними спектрами необхідно мати широкосмуговий магнітометр з лінійно-пласкою частотною характеристикою (рис. 1, пунктирна лінія). Таку характеристику можна отримати декількома методами: 1) інтегруванням вихідного сигналу; 2) використанням датчика з підсилювачем струму; 3) використанням датчика з від'ємним зворотним зв'язком по магнітному полю.

Проектування ІМ кожним з цих методів має свої особливості.

1. Як видно з виразу (1) і рис. 1, котушка індуктивності працює як диференціальна ланка на частотах, нижчих від частоти резонансу. Ліній-

ність характеристики досягають інтегруванням сигналу котушки. В цьому випадку частотний діапазон ІМ обмежений з боку високих частот частотою резонансу, з боку низьких частот — дрейфом нуля інтегратора.

2. У випадку використання датчика з підсилювачем струму котушка навантажена на інвертувальний вхід операційного підсилювача, тобто працює в режимі, близькому до короткого замикання. Частотна характеристика буде лінійною до частоти  $\omega_1=R/L$ , після неї — незалежною від частоти. Головні недоліки цієї схеми: труднощі реалізації низької частоти перегину й вищий поріг чутливості, ніж у схемі з підсилювачем напруги.

3. Схема з від'ємним зворотним зв'язком по магнітному полю дає змогу одержати широкосмугову частотну характеристику, низький поріг чутливості й головне — забезпечити плоску амплітудно-частотну характеристику в широкому діапазоні частот, навіть дуже низьких. На практиці це рішення, певно, є найпоширенішим.

Розглянемо особливості проектування широкосмугового ІМ з мінімально можливим РШ.

**Вплив осердя і намотки на параметри ІМ.**

З виразу (1) видно, що вихідний сигнал ІМ пропорційний кількості витків  $n$ , площі поперечного перерізу осердя  $S$  і відносній магнітній проникності осердя  $\mu_c$ . Можна припустити, що для збільшення чутливості ІМ бажано зробити кожен з цих множників якнайбільшим. Розглянемо спочатку вплив збільшення величини  $\mu_c$ .

Першим кроком для досягнення високого значення  $\mu_c$  є використання м'якого магнітного матеріалу з якнайбільшою відносною магнітною проникністю  $\mu$ . Однак через явище розмагнічування [Аркадьєв, 1935] результуюча магнітна проникність осердя  $\mu_c$  буде меншою від магнітної проникності матеріалу  $\mu$  і залежатиме від форми осердя. Вона може бути обчислена за формулою [Мизюк, 1964]

$$\mu_c = \frac{\mu}{1 + N(\mu - 1)}. \tag{2}$$

Тут  $N$  — коефіцієнт розмагнічування, залежить від геометрії осердя і для триосьового еліпсоїда обертання може бути обчислений за спрощеною формулою [Мизюк, 1964]

$$N \approx \frac{\ln 2m - 1}{m^2}, \tag{3}$$

де  $m$  — відношення довжини осердя  $l$  до його діаметра  $d$ .

Н. Фельдкеллер [Кадинская, 1958] запропонував найпоширеніший вираз, який дає досить низьку похибку та який широко використовують для практичних обчислень:

$$N = 5S/l^2. \quad (4)$$

За даними рис. 2 можна визначити найнижчу межу  $\mu$  для певного  $m$ , за яких  $\mu_c$  не змінюється у разі ймовірної зміни  $\mu$  у широких межах під впливом різних чинників [Bozorth, Chapin, 1942].

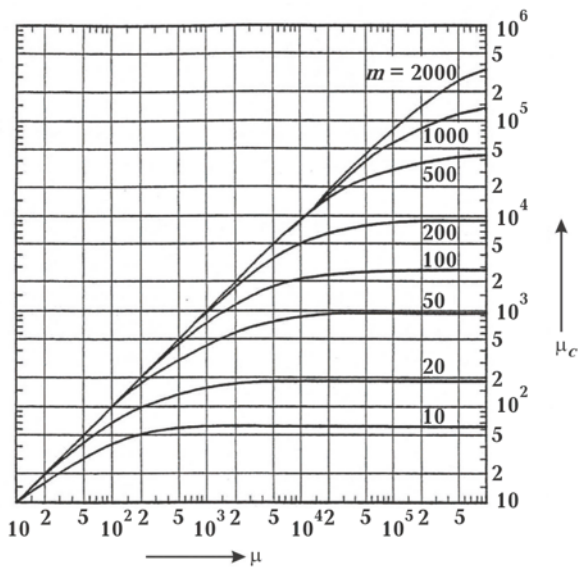


Рис. 2. Залежність магнітної проникності циліндричного осердя  $\mu_c$  від магнітної проникності матеріалу  $\mu$  і відношення довжини до діаметра стрижня  $m$  [Bozorth, Chapin, 1942].

Оскільки чим більша  $\mu_c$ , тим вища чутливість ІМ, рекомендується вибирати осердя видовженої форми з  $m > 50$ . Для цього слід вибирати матеріал з  $\mu > 30\,000$ , інакше її зміни можуть призвести до небажаної зміни чутливості. Крім того, постійне магнітне поле Землі може зумовити намагнічування осердя з великим  $m$  та насичення матеріалу осердя з відповідним зменшенням  $G$  та інших параметрів ІМ. Так, для сильно видовжених осердь максимальне значення магнітної проникності  $\mu_{cmax}$ , за якого чутливість змінюється на величину, що не перевищує відносно допустиме значення  $\delta$  під час намагнічування осердя постійним магнітним полем  $H_e \leq H_{max}$ , можна обчислити за формулою [Корепанов, Berkman, 1997]

$$\mu_{cmax} = \frac{\mu}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{\delta} - 1\right) \left(\frac{\pi H_{max} \mu}{2B_s}\right)^2 - 1}}, \quad (5)$$

де  $B_s$  — індукція насичення матеріалу осердя;  $\delta$  — відносно допустиме значення зміни чутливості за обертання осердя у зовнішньому магнітному полі  $H_e \leq H_{max}$ .

Цей вираз дійсний приблизно до  $\mu_c H_e < B_s$ . Обчислення показують, що значення  $\delta$  змінюється дуже різко, коли  $\mu_c$  наближається до  $\mu_{cmax} = B_s H_e^{-1}$ .

Таким чином, для рекомендованого значення  $m$  (50—100) за великого значення  $\mu$  (понад 50 000) можна одержати значення  $\mu_c$  до 2500 з достатньо низькою чутливістю до змін  $\mu$  (див. рис. 2). Також помірна величина  $\mu_c$  гарантує, що осердя не буде намагнічуватись у постійному магнітному полі Землі.

Наступним параметром, який впливає на чутливість ІМ, є площа перерізу осердя  $S$ . Як видно з формули (1), вибравши якомога більшу  $S$ , здавалося б, можна підняти  $G$ . Проте, як показано вище, відношення  $m = l/d$  уже визначене з інших міркувань, і збільшення  $S$ , або, що є тим самим,  $d$ , зменшить пропорційно  $m$ , тоді  $\mu_c$  також зменшиться і зменшить ефект від збільшення  $S$ . Отже, цей спосіб не є ефективним.

Ще одна можливість підвищити чутливість за виразом (1) збільшенням кількості витків котушки  $n$  також не дуже ефективна, тому що збільшення призводить до підвищення активного опору обмотки, відповідно збільшуючи її тепловий шум. Для компенсації цього небажаного явища необхідно збільшити діаметр витка, що зумовить зростання маси міді. Теоретичний аналіз та експериментальна перевірка показують, що поріг чутливості ІМ  $W_{BM}$  залежить від маси котушки (міді), як [Вакульский и др., 1985]:

$$W_{BM} = \frac{K}{\mu_c \omega d \sqrt{M}}, \quad (6)$$

де  $K = 8\sqrt{kT\Delta f\rho\gamma}$ , а кількість витків вибирають з умови оптимального узгодження котушки з підсилювачем.

Розглянемо вплив способу нанесення обмотки на чутливість ІМ. Очевидно, що переважно котушку не намотують безпосередньо на осердя, для цього використовують спеціальну бобіну. Отже, обмотка, виконана на бобіні, має внутрішній  $D_i$  і зовнішній  $D_e$  діаметри, які відповідають відношенню  $D_e > D_i > d$ .

Відомо, що чим більша ця нерівність, тим менша чутливість  $G$  [Вакульский и др., 1985]. Таким чином, можна стверджувати, що величина  $G$  обернено пропорційна середньому діаметру котушки  $D_m = \frac{D_e + D_i}{2}$ . Як показано в

монографії [Вакульский и др., 1985], величина  $\mu_c$  зменшується через відмінність діаметра витків котушки від діаметра осердя і пропорційна  $\mu_c \equiv D_m^{-3/2}$ .

Також  $\mu_c$  зменшується через те, що довжина котушки  $l_n$  завжди менша за довжину осердя  $l$ . Параметр  $\mu_c$  не є сталою величиною вздовж осердя і досягає максимального значення  $\mu_{cc}$  в центрі осердя, яку для поширення осердь у вигляді призматичних стрижнів визначають, як [Мизюк, 1964]:

$$\mu_{cc} = \frac{\mu}{1 + 0,974 \frac{S}{l^2} \left[ \ln \left( l \sqrt{\frac{\pi}{S}} \right) - 1 \right] (\mu - 1)}. \quad (7)$$

Зазвичай котушка не розташована на всій довжині осердя через те, що відносна вихідна напруга ІМ зменшується з  $l_n/l \rightarrow 1$  [Dehmel, 1989]. У загальному випадку рекомендується таке співвідношення:

$$l_n \approx (0,5 - 0,7)l. \quad (8)$$

З цієї точки зору, конструкцію котушки, розташованої на всій довжині осердя, яка запропонована в статті [Paperno, Grosz, 2009], назвати «оптимальною» дуже сумнівно. Відповідно, середнє значення магнітної проникності осердя  $\mu_{cca}$  для котушки фіксованої довжини  $l_n$  дорівнює [Мизюк, 1964]:

$$\mu_{cca} = \mu_{cc} \left[ 1 - 0,255 \left( \frac{l_n}{l} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Отже, на підставі наведеного вище можна відповідним чином вибрати необхідні параметри осердя й котушки.

**Методика проектування ІМ.** Для відносно вузькосмугових ІМ ( $f_{\max}/f_{\min} < 1000$ ) неважко визначити параметри датчика, і прості наближення, подані в статтях [Coillot et al., 2007; Paperno, Grosz, 2009], не приведуть до великої помилки: реально досяжний рівень шуму близький до теоретичного для заданих маси і розмірів датчика.

Для широкосмугових ІМ ( $f_{\max}/f_{\min} < 1000$ ) пряме узгодження датчика з попереднім підсилювачем неможливе через різну частотну залежність вихідного імпедансу датчика та оптимального опору джерела сигналу для підсилювача. Розрахунок порогу чутливості ІМ у широкій смузі за обмежень маси/габаритів потребує одночасного врахування великої кількості його параметрів (тільки для датчика в літературі описано понад 30 геометричних і

електричних величин). До того ж, деякі з цих параметрів взаємозалежні чи можуть бути вибрані з обмеженого діапазону. Ось чому, незважаючи на нібито просте завдання, визначення оптимального набору параметрів ІМ розв'язанням системи рівнянь неможливе.

На практиці використовують такі способи розрахунку широкосмугових ІМ:

1) усереднені параметри датчика й підсилювача, необхідні для розрахунку, вибирають на основі попередніх випробувань подібних пристроїв, а потім шумові параметри розраховують для ряду можливих для певної конструкції значень цих параметрів;

2) приймають рекомендовані в літературі співвідношення між деякими усередненими параметрами, необхідними для розрахунків, виходячи із загальних міркувань.

У першому випадку досягнення оптимального набору параметрів не гарантується передусім тому, що варіанти вибирають довільно. У другому випадку параметри вибрані частково теж довільно, до того ж, використання відомих рівнянь без урахування відповідних обмежень, у межах яких вони були виведені, може дати значні помилки.

Найчастіше оптимальну комбінацію датчик—підсилювач знаходять за розрахунком оптимальних параметрів датчика для ідеального підсилювача, а потім узгоджують з реальним підсилювачем за допомогою корекції кількості витків датчика. Ця процедура дає не оптимальну комбінацію, а поєднання двох відносних оптимумів, що, як правило, призводить до некоректного результату, особливо в діапазоні високих частот.

У публікаціях [Korepanov, Berkman, 1997; Berkman, 1997] запропонований новий підхід до оптимізації широкосмугового ІМ. Головна особливість цього методу полягає у введенні так званих узагальнених параметрів датчика, значення яких можна розглядати як сталі для певного матеріалу осердя.

Набір чотирьох основних і трьох додаткових узагальнених параметрів наведено у таблиці. Очевидно, що розкид параметрів  $K_R$ ,  $f_F$ ,  $Q_h$  і  $Q_0$  достатньо великий. Однак ці параметри мають порівняно слабкий вплив на загальний рівень шуму ІМ, до того ж лише в окремих частинах діапазону частот.

Використання узагальнених параметрів дає змогу подати всі параметри датчика у простому і фізично ясному вигляді, наприклад:

$$G = K_s f l^2 n; \quad (10)$$

Узагальнені параметри ІМ

| Параметр | Розмірність                              | Фізичний зміст   | Попередня оцінка         |
|----------|--|--|--------------------------|
| $K_S$    | $B/(T\cdot\Gamma\cdot m^2\text{-виток})$ | Чутливість ІМ завдовжки 1 м з $n=1$ на частоті 1 Гц за холостого ходу            | $1\pm 20\%$              |
| $K_L$    | $\Gamma n/(m\text{-виток}^2)$            | Індуктивність такого самого ІМ   | $2\cdot 10^{-7}\pm 25\%$ |
| $K_f$    | $\Gamma/(m^{1/2}\text{-виток})$          | Частота власного резонансу такого самого ІМ                                      | $4\cdot 10^7\pm 25\%$    |
| $K_R$    | $\Gamma\cdot m^2$                        | Частота, на якій індуктивний та активний опір такого самого ІМ однакові          | $0,5\pm 3,5$             |
| $f_F$    | $\Gamma$                                 | Частота, на якій добротність, що визначається струмами Фуко, дорівнює одиниці    | $(5\pm 500)\cdot 10^3$   |
| $Q_h$    | —  | Добротність, що визначається втратами на гістерезис в осерді                     | $50\pm 200$              |
| $Q_0$    | —  | Добротність на частоті резонансу, що визначається втратами в паразитних ємностях | $3\pm 10$                |

$$L = K_L l n^2; \quad (11)$$

$$Q = 1/\left[ K_R/(l^2) + 1/Q_h + f/f_F \right]; \quad (12)$$

$$f_{res} = K_f/(l^{1/2}n); \quad (13)$$

$$R = 2\pi K_R K_L w^2/l, \quad (14)$$

де  $Q$  — сумарна добротність, що залежить від втрат в осерді й котушці.

Слід зауважити, що вибір певної комбінації узагальнених параметрів означає вибір матеріалів і конструкції, яку визначають за співвідношенням геометричних розмірів. Тому запропонований метод розрахунку є особливо простим і ефективним для визначення оптимальної довжини і кількості витків геометрично подібних ІМ.

Повернімося до підсилювача. Відомо, що спектр його шумів характеризується вісьмома шумовими параметрами: мінімальна густина шумів за напругою  $W_{u0}$ ; частота перегину і кут нахилу на низьких частотах  $f_{u1}$ ,  $\alpha_u$ ; частота перегину додаткового нахилу на наднизьких частотах  $f_{u2}$ ; мінімальна густина шумів за струмом  $W_{i0}$ ; частота перегину і кут нахилу шумового струму на високих частотах  $f_{i1}$ ,  $\alpha_i$ ; частота перегину на низьких частотах  $f_{i2}$ . Відповідно, частотні залежності густин шумів за напругою і струмом можуть бути розраховані за рівняннями

$$W_{uamp} = W_{u0} \left[ 1 + (f/f_{u1})^{\alpha_u} + (f/f_{u2})^2 \right]; \quad (15)$$

$$W_{iamp} = W_{i0} \left[ 1 + (f/f_{i1})^{\alpha_i} + (f_{i2}/f)^2 \right]. \quad (16)$$

Маючи наведені вище залежності, можна розрахувати оптимальну конструкцію ІМ.

Рівняння для розрахунку частотного спектра шумів магнітометра складемо, згідно з еквівалентною схемою (рис. 3). Тут  $E_x$  — вихідна ЕРС датчика;  $U_r$  — еквівалентна шумова напруга активної частини імпедансу датчика (активний опір —  $R$ ; втрати на гістерезис —  $R_h$ ; втрати на вихрові струми —  $R_F$ ) з густиною  $W_r=4kT(R+R_h+R_F)$ ;  $I_{r0}$  — шумовий струм втрат ( $R_0$ ) в ємності  $C$  вимірювальної котушки з густиною  $W_{Ir0}$ ;  $R_i$  — вхідний опір підсилювача (ві опори вважаємо таким, що не шумлять);  $U_n$  і  $I_n$  — вхідні шумова напруга і струм підсилювача з густинами  $W_{uamp}$  і  $W_{iamp}$  відповідно, які характеризуються вищезгаданими вісьмома параметрами.

Згідно з рис. 3, результуючу густину шумів за напругою  $W$ , приведену до входу підсилювача, визначаємо, як

$$W = W_r k_U^2 + W_{Uamp} + (W_{Iamp} + W_{Ir0}) Z^2 k_U^2, \quad (17)$$

$k_U = \frac{Z_C}{Z_C + Z_L}$  — передавальна функція схеми, де  $Z = \frac{Z_C Z_L}{Z_C + Z_L}$  — імпеданс датчика,

$$Z_C = \frac{R_0/j\omega C}{R_0 + 1/j\omega C}, \quad Z_L = R + R_h + R_F + j\omega L.$$

Використавши визначення для чутливості датчика  $G=U_0/H_e$  з (1), отримаємо рівняння для загальної густини шумової потужності у величинах вимірюваного магнітного поля  $W_B$ :

$$W_B = \frac{W}{G^2 k_U^2} = \quad (18)$$

$$= \frac{1}{G^2} \left[ W_r + \frac{W_{Uamp}}{k_U^2} + (W_{Iamp} + W_{Ir0}) Z^2 \right].$$

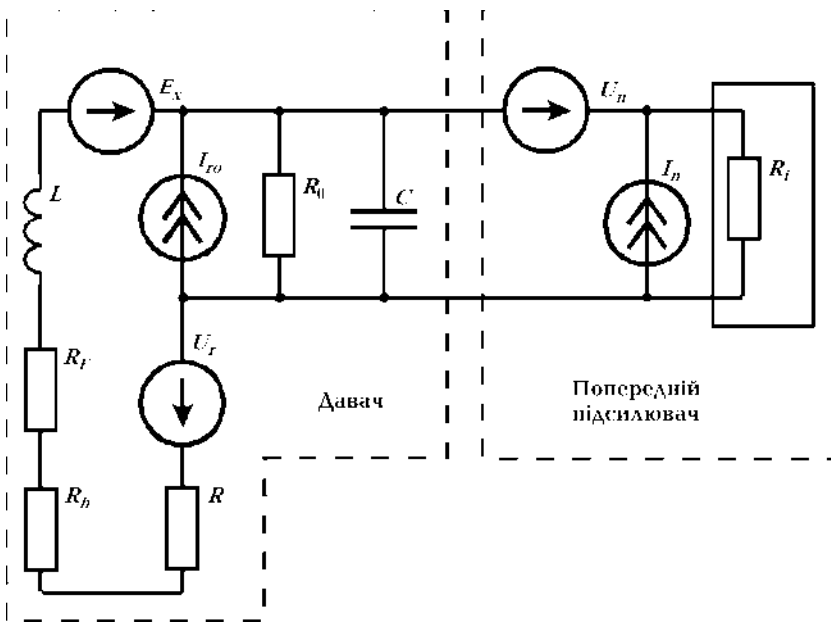


Рис. 3. Еквівалентна шумова схема ІМ.

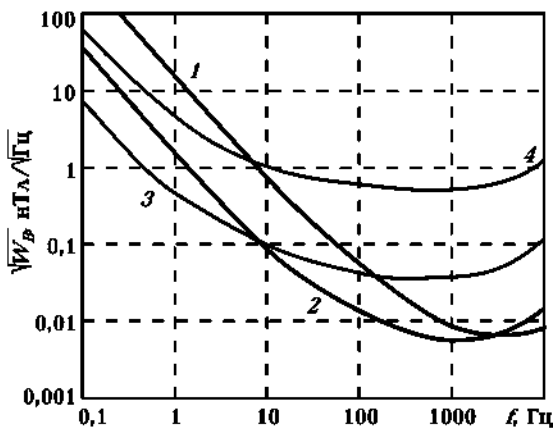


Рис. 4. Вплив кількості витків на рівень власних шумів ІМ.



Рис. 5. Порівняння розрахункової (1) та експериментальної (2) залежності РШ.

На підставі отриманого виразу (18) створено розрахункову програму із сервісною частиною, яка дає змогу подати набір РШ для ІМ у вигляді таблиці або графіків, де деякі параметри можуть бути змінені. За такої можливості зміни параметрів легко знайти комбінацію, яка найістотніше впливає на РШ у частині діапазону частот, найважливішій для споживача. Сервіс у межах програми містить набір значень узагальнених параметрів датчика для широкого кола основних матеріалів осердь і основних варіантів конструкції; також збе-

рігаються вхідні параметри для різних типів підсилювачів.

За врахування всіх основних параметрів датчика й підсилювача висока точність остаточних результатів розрахунку гарантується. Важливо, що в разі зміни конструктивних параметрів датчика корекція відповідних змін у спектрі шуму проводиться автоматично. Приклад на рис. 4 ілюструє вплив зміни кількості витків датчика на шумові параметри ІМ. Добре видно, що мінімум шуму зміщується в бік низьких частот зі збільшенням кількості витків (графіки 1—3;  $W_3 > W_2 > W_1$ ). Коли оптимум пройдений, рівень шуму збільшується на всіх частотах (графік 4,  $W_4 > W_3$ ).

Для оцінки мінімально можливого РШ заданої довжини осердя  $l$  може бути використана напівемпірична формула [Корепанов, Verkman, 1999]:

$$W_{Be} \approx h_0 \left( 1 + A/l^5 f^2 + B/l^5 f^4 \right)^{1/2}, \quad (19)$$

де  $h_0 \approx 10^{-14}$  нТл/Гц<sup>1/2</sup>;  $A \approx 30$  м<sup>5</sup>·Гц<sup>2</sup>;  $B \approx 10^{-4}$  м<sup>5</sup>·Гц<sup>4</sup>.

Наводимо деякі коментарі до цього виразу. По-перше, тут РШ розглянуто тільки відповідно до довжини осердя, що справедливо лише для геометрично подібних ІМ. Вираз має сенс лише для діапазону частот  $f > f_{res}$  і діє для оптимізованого ІМ з осердям з високим  $\mu$ . І, нарешті, другий доданок  $B/l^5 f^4$  відображає додаткові збільшення шуму підсилювача на інфранизьких частотах і для сучасних підсилювачів за схемою модулятор—демодулятор може бути знехтуваним.

Для ілюстрації ефективності використання описаної методики розрахунку ІМ на рис. 5 порівняні розрахункова та експериментально отримана залежності РШ від частоти для реального ІМ типу LEMI-106. Як видно, збіг обох кривих дуже добрий. За цією методикою у Львівському центрі Інституту космічних досліджень (ЛЦ ІКД) створений цілий ряд ІМ для діапазону частот від  $10^{-4}$  до  $10^6$  Гц з параметрами, рівень яких не поступається кращим зразкам у світі (детальнішу інформацію можна отримати на сайті ЛЦ ІКД; [www.isr.lviv.ua](http://www.isr.lviv.ua)).

**Висновки.** Описаний взаємний вплив конструктивних і електричних параметрів індук-

ційних магнітометрів, а також розглянуті особливості їх проектування.

Для запропонованої еквівалентної шумової схеми ІМ виведено рівняння для загальної густини шумової потужності. Показано, що отримання ІМ з низьким рівнем шуму потребує складної процедури розрахунку. Для її спрощення розроблено метод узагальнених параметрів, який дав змогу створити й запропонувати вітчизняним і закордонним геофізикам широкий набір ІМ з оптимальним набором параметрів.

Робота виконана за часткової підтримки контракту 3165 з УНТЦ.

### Список літератури

- Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 1. — Москва: ОНТИ, 1935. — 53 с.
- Беркман Р. Я. Широкополосные индукционные магнитометры с минимальной массой // Тр. 5-го Нац. симп. по магнитным измерениям, Кельце—Борков, Польша, 22—24 окт. 1997. — С. 45—52.
- Вакульский Ф. Ф., Мизюк Л. Я., Праць Р. В., Сикачевский Ю. Ю. Аппаратура для аэрогеофизической разведки с магнитными и электромагнитными информационными каналами. — Киев: Наук. думка, 1985. — 253 с.
- Кажинская Л. К расчету магнитной проницаемости сердечников для магнитомодуляционных датчиков // Технический информационный бюллетень геофизической аппаратуры. — Ленинград, 1958. — С. 113—120.
- Мизюк Л. Я. Первичные преобразователи для измерения низкочастотных магнитных полей. — Киев: Наук. думка, 1964. — 168 с.
- Bozorth R. M., Chapin D. M. Demagnetization factors of rods // J. Appl. Phys. — 1942. — **13**. — P. 320—326.
- Coillot C., Montoussamy J., Leroy P., Chanteur G., Roux A. Improvements on the design of search coil magnetometer for space experiments // Sensors Lett. — 2007. — **5**. — P. 167—170.
- Dehmel G. Magnetic field sensors — induction coil (search coil) sensors. Ch. 6 // Sensors — a comprehensive survey. — VCH Publ., 1989. — P. 205—254.
- Korepanov V., Berkman R. New approach to the exact design of low noise search-coil magnetometers // Proc. of XIV IMEKO Word Congr. New measurements — challenges and visions. — Tampere, Finland, 1997. — IVA Topic 4. — P. 103—108.
- Korepanov V., Berkman R. Comparison of magnetometers efficiency for ELF band. Measurement'99 // Proc. the 2<sup>nd</sup> Int. conf. of measurement, Smolenice, Slovak Republic. Apr. 26—29, 1999. — Smolenice, 1999. — P. 195—198.
- Paperno E., Grosz A. A miniature and ultralow power search coil optimized for a 20 mHz to 2 kHz frequency range // J. Appl. Phys. — 2009. — **105**. — 07E708.
- Ripka P. Induction Sensors. Ch. 2 // Magnetic sensors and Magnetometers. — Artech House, 2001. — P. 47—74.
- Tumanski S. Induction coil sensors — a review // Meas. Sci. Techn. — 2007. — **18**. — P. 31—46.