

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ІНДУКЦІЙНИХ МАГНІТОМЕТРІВ

В.О. Проненко, кандидат технічних наук, завідувач відділу Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та НАКА України



Запропоновано новий метод оцінки якості індукційних магнітометрів і показано, що його застосування дає можливість ефективно порівнювати різні за конструкцією індукційні магнітометри за критерієм мінімального рівня магнітного шуму. Обговорено обмеження запропонованого методу.

A new method of induction magnetometers quality evaluation is proposed and is shown that its application allows the effective comparison between induction magnetometers of different construction on the criterion of minimal level of the magnetic noise. The method limitations are discussed.

Порівняння якості індукційних магнітометрів (ІМ) є важливим завданням як для правильного вибору ІМ для проведення конкретних досліджень, так і для визначення місця розроблюваного ІМ серед кращих існуючих зразків. На сьогодні такого критерію оцінки не існує, що можна пояснити, по-перше, відсутністю необхідних параметрів у документації запропонованих на ринку магнітометрів

і, по-друге, тим, що всі деталі проектування ІМ є комерційною таємницею виробника. Метою цієї роботи є визначення потрібного мінімального набору параметрів ІМ (серед доступних) для проведення оцінки їх якості і порівняння існуючих на ринку ІМ, розроблених різними компаніями. Природно, що це повинні бути параметри, які завжди надаються разом зі зразками запропонованих на ринку ІМ.

Відомо, що найважливішим параметром ІМ є рівень шуму, який завжди надається виробниками і може бути вибраний критерієм для порівняння. Крім рівня шуму, в технічній документації завжди вказуються частотний діапазон, споживана потужність, розміри та маса ІМ, і за цими параметрами всі ІМ дещо відрізняються один від одного, що ускладнює об'єктивне порівняння. Оскільки, як уже сказано, головним критерієм є рівень шумів ІМ, запропонуємо методику порівняння ІМ за цим параметром і покажемо, що рівень шуму дійсно залежить в основному від розмірів та маси ІМ.

Поріг чутливості ІМ визначається рівнем його шуму, приведеним до входу. Щоб обчислити цей рівень шуму, звернемося до найповнішої еквівалентної шумової схеми ІМ (рис. 1), запропонованої в [1].

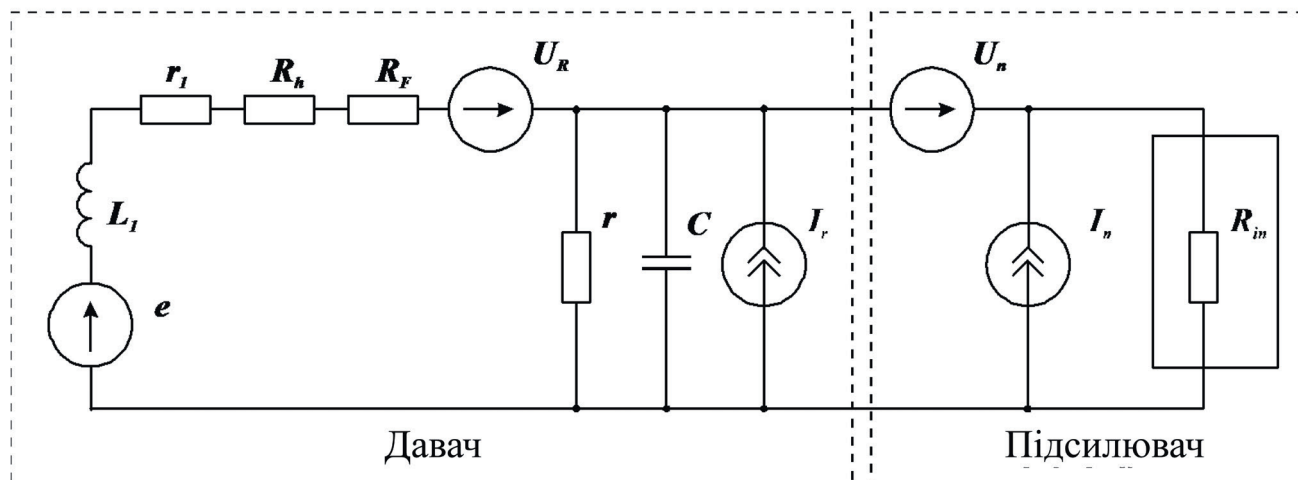


Рис. 1. Еквівалентна шумова схема ІМ: e – вихідна ЕРС давача; r_1 – активний опір вимірювальної котушки (вважаємо, що всі опори не шумлять); R_n – втрати на гістерезис; R_F – втрати на вихрові струми; U_R – еквівалентна шумова напруга активної частини імпедансу давача з густиною потужності W_r , $W_r = 4kT(r_1 + R_n + R_F)$; C – власна ємність вимірювальної котушки; r – опір втрат у власній ємності вимірювальної котушки; I_r – активний струм втрат в ємності C з густиною потужності W_r ; R_{in} – вхідний опір підсилювача; U_n і I_n – вхідні шумова напруга і струм попереднього підсилювача з густинами потужності $W_{шум}$ і $W_{іамп}$ відповідно

Згідно зі схемою на рис. 1, рівняння для густини шумової потужності у величинах вимірюваного магнітного поля W_B має вигляд

$$W_B = \frac{W}{G^2 \cdot k_U^2} = \frac{1}{G^2} \cdot \left[W_r + \frac{W_{Uamp}}{k_U^2} + \frac{(W_{lamp} + W_{lr}) \cdot Z^2}{k_U^2} \right],$$

де G – чутливість давача, $G = \omega \cdot n \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_c$; S – поперечний переріз осердя; μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ_c – відносна магнітна проникність осердя; n – кількість витків котушки; Z – імпеданс давача,

$$Z = \frac{Z_C \cdot Z_L}{Z_C + Z_L},$$

де

$$Z_C = \frac{r_1 / j\omega C}{r_1 + 1 / j\omega C},$$

$$Z_L = r_1 + R_h + R_F + j\omega L;$$

k_U – передатна функція схеми,

$$k_U = \frac{Z_C}{Z_C + Z_L}.$$

Розглянемо випадок, коли підсилювач ідеальний і робоча частота достатньо низька, щоб можна було прийняти $r_1 \gg R_h$, $r_1 \gg R_F$. Тоді густину шумової потужності можна записати як

$$W_B = \frac{W_r}{G^2} = \frac{4kTr_1}{(2\pi \cdot f \cdot nS\mu_0\mu_c)^2}. \quad (1)$$

Активний опір вимірювальної котушки визначається як

$$r_1 = \frac{\rho\gamma\pi^2 \cdot n^2 D_m^2}{m_{Cu}},$$

де ρ – питомий опір міді; γ – питома вага міді; D_m – середній діаметр котушки; m_{Cu} – маса котушки.

Візьмемо до уваги, що $m_{Cu} = \gamma \cdot V_{Cu}$, де V – об'єм котушки, і позначимо відношення зовнішнього діаметра обмотки D_2 до внутрішнього D_1 як $k_d = D_2 / D_1$. Для спрощення внутрішній діаметр обмотки D_1 приймемо рівним діаметру осердя d , тоді D_1 як $k_d = D_2 / d$, а активний опір обмотки можна записати як

$$r_1 = \frac{\pi\rho \cdot n^2 (k_d + 1)}{l(k_d - 1)}. \quad (2)$$

Підставляючи в (1) значення r_1 з (2) та використавши спрощений вираз з [2] для відносної магнітної проникності осердя

$$\mu_c \approx \frac{1}{N} = \frac{l^2}{5S},$$

де l – довжина осердя, S – площа перерізу, отримаємо

$$W_B = \frac{25kT\rho}{\pi \cdot f^2} \frac{1}{l^5} \frac{k_d + 1}{k_d - 1}. \quad (3)$$

З виразу (3) знаходимо мінімальний рівень густини шумової потужності для даної довжини осердя при $k_d \rightarrow \infty$:

$$W_{Bmin} = \frac{25kT\rho}{\pi \cdot f^2} \frac{1}{l^5}. \quad (4)$$

З іншого боку, поріг чутливості ІМ B_{min} залежить від маси котушки (міді) m_{Cu} як [3]

$$B_{min} = \frac{8 \cdot \sqrt{k \cdot T \cdot \Delta f \cdot \rho \cdot \gamma}}{\mu_c \cdot \omega \cdot d \cdot \sqrt{m_{Cu}}}, \quad (5)$$

де k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

Виведені співвідношення дозволяють подати залежність порогу чутливості ІМ від довжини давача і його ваги. Використовуючи формули (4) і (5) відповідно, можна встановити, що:

- поріг чутливості кожного ІМ зменшується зі збільшенням довжини його осердя l як $l^{5/2}$;
- поріг чутливості кожного ІМ зменшується зі збільшенням маси міді m_{Cu} як $m_{Cu}^{1/2}$.

Із досвіду побудови ІМ відомо, що повна довжина ІМ практично збігається з довжиною осердя, а відношення маси міді до повної маси ІМ відхиляється незначно. Це дозволяє припустити, що саме вся довжина ІМ є корисною довжиною, яка входить у вираз (4), а вся маса ІМ є масою міді. При таких припущеннях, маючи довжину ІМ, ми можемо, використовуючи рівняння (4), звести решту параметрів у коефіцієнт K_1 і дати оцінку мінімально можливого теоретично порогу чутливості W_{Bi} для давача довжиною l у вигляді

$$\sqrt{W_{Bi}} = \frac{K_1}{\sqrt{l^5}}.$$

Так само, прийнявши у рівнянні (5) для геометрично подібних давачів усі параметри, крім маси, аналогічними і зводячи їх у коефіцієнт K_2 , можемо переписати (5) у вигляді

$$\sqrt{W_{Bm}} = \frac{K_2}{\sqrt{m_{Cu}}}.$$

Введемо величину

$$W_{Bi} = \sqrt{W_{Bm}} \sqrt{W_{Bl}} = \frac{K_n}{\sqrt{l^5} \sqrt{m_{Cu}}}$$

($K_n = K_1 K_2$ – масштабний множник), яка має ту ж розмірність, що й густина шумової потужності, і пов'язана з густиною шумової потужності ідеального ІМ з масою m_{Cu} та довжиною l . Використовуючи ці значення, а також припустивши, що всі порівнювані ІМ топологічно подібні, введемо поняття коефіцієнта якості QF , який подамо у вигляді

$$QF = \frac{W_{Bi}}{W_B} = \frac{K_n}{W_B \sqrt{l^5} \sqrt{m_{Cu}}}. \quad (6)$$

Фізичний зміст введення критерію якості QF зводиться до порівняння рівнів шумів ідеального

давача із заданими l і m_{Cu} , наведеними в специфікаціях ІМ, який перевіряється, з реальною величиною порогового шуму W_B цього ж давача, яка завжди більша від ідеальної, і отримання числового виразу цього порівняння. Очевидно, що чим ближче реальне значення W_B до ідеального, тим більшим буде коефіцієнт якості і тим кращим буде досліджуваний ІМ. Числова величина K_n може бути обрана довільно: при припущенні топологічної подібності ІМ це не має значення, оскільки для них K_n будуть однаковими. Оскільки ми не обчислювали точного значення K_n , приймаємо його рівним одиниці. Тому значення QF може мати довільний множник, а не наближатися до 1, як це повинно бути з урахуванням його фізичного змісту.

Перевіримо ефективність такого підходу на прикладі порівняння величин QF найвідоміших низькочастотних ІМ (табл. 1), які працюють у діапазоні частот від $\sim 10^{-4}$ до $\sim 10^3$ Гц, а також магнітометра LEMI-120 і його скороченого за довжиною варіанта LEMI-121, розроблених у ЛЦ ІКД.

Побудуємо спочатку залежності густини їх власного шуму від частоти (рис. 2) і нанесемо на цей рисунок спектр природних шумів. Видно, що шумові

залежності всіх ІМ ідуть нижче від графіка спектра природних шумів і досить близькі один до одного, що показує практичну подібність усіх наведених низькочастотних ІМ за параметром мінімального порогу чутливості. Але цей рисунок не показує, який із зондів кращий, оскільки їх довжини і маси відрізняються. Якщо ж обчислити коефіцієнт якості для кожного із цих ІМ за формулою (6) і нанести відповідні точки на рис. 3, відразу видно різницю між ними. Підтвердженням ефективності цієї методики можна вважати кластеризацію оцінок для ІМ, визнаних у світі найкращими, і значне віддалення оцінки для найгіршого з них.

Спроба порівняти високочастотні ІМ (див. табл. 2 та рис. 3, 4 відповідно) не дала позитивного результату. Те саме й зі спеціалізованими ІМ, наприклад, для космічних досліджень: дуже велике розсіювання може бути пояснене невиконанням однієї з основних умов порівняння – топологічної подібності; методика порівняння якості таких ІМ потребує подальшого дослідження. Слід також відзначити, що високочастотні ІМ оптимізуються для різних діапазонів частот – від сотень герц до десятків кілогерц, тому їх якість не можна порівнювати на одній частоті.

Таблиця 1

Основні параметри кращих низькочастотних ІМ

ІМ	Частотний діапазон, Гц	Коефіцієнт перетворення на плоскій частині АЧХ, мВ/нТл	Довжина, м	Маса, кг	Поріг чутливості, нТл/(Гц) ^{1/2}	Посилання
MTC-50	2·10 ⁻⁵ ...400 3 дБ (0,1...10)	500	1,41	8,2	1·10 ⁻¹ ...10 ⁻³ Гц 1·10 ⁻⁴ ... 1 Гц 1·10 ⁻⁴ ...10 ² Гц	[4]
MTC-80	10 ⁻⁴ ...400 3 дБ (0,5...5)	500	0,98	4,8	2·10 ⁻¹ ...10 ⁻³ Гц 2·10 ⁻⁴ ... 1 Гц 1·10 ⁻⁴ ...10 ² Гц	[4]
BF-4	1·10 ⁻⁴ ...700 3 дБ (0,2...500)	300	1,42	7,9	2·10 ⁻¹ ...10 ⁻³ Гц 8·10 ⁻⁵ ...1 Гц 2·10 ⁻⁵ ...10 ² Гц	[5]
BF-7	1·10 ⁻⁴ ...700 3 дБ (0,2...500)	300	1,04	7	1...10 ⁻³ Гц 1,5·10 ⁻⁴ ...1 Гц 3·10 ⁻⁵ ...10 ² Гц	[5]
ANT/4	5·10 ⁻⁴ ...1000 3 дБ (0,2...1000)	100	1,38	6,2	0,2...10 ⁻³ Гц 1·10 ⁻⁴ ...1 Гц 2·10 ⁻⁵ ...10 ³ Гц	[6]
MFS-06 (chopper on)	2,5·10 ⁻⁴ ...500 3 дБ (4)	200	1,15	9	1·10 ⁻² ...10 ⁻² Гц 1,1·10 ⁻⁴ ...1 Гц	[7]
MFS-07 (chopper on)	2·10 ⁻³ ...500 3 дБ (32)	640	0,7	6,1	3·10 ⁻² ...10 ⁻² Гц 3·10 ⁻⁴ ...1 Гц	[8]
LEMI-120	1·10 ⁻⁴ ...1000 3 дБ (1...1000)	400	1,34	6	1·10 ⁻¹ ...10 ⁻³ Гц 1·10 ⁻⁴ ...1 Гц 1·10 ⁻⁵ ...10 ³ Гц	[9]
LEMI-121	1·10 ⁻⁴ ...500 3 дБ (1...500)	400	0,56	4	6·10 ⁻¹ ...10 ⁻³ Гц 5·10 ⁻⁴ ...1 Гц 3·10 ⁻⁵ ...10 ² Гц	[10]

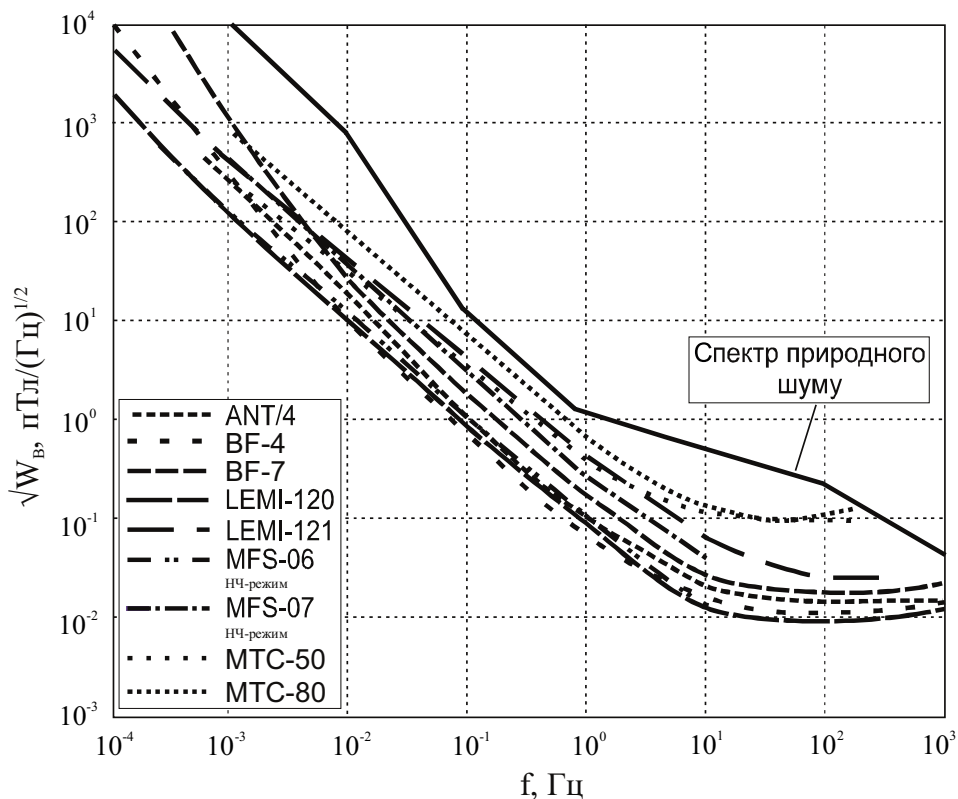


Рис. 2. Рівень власних шумів низькочастотних ІМ

Отже, у цій роботі зроблено першу спробу виведення об'єктивного критерію оцінки якості ІМ. Незважаючи на деяку умовність прийнятих припущень, отримані результати переконливо підтверджують, що навіть при наявному обме-

женні застосування запропонованої методики тільки до одного підвиду ІМ – низькочастотних – вже перша спроба порівняння якості таких ІМ є прийнятною і може бути застосована на практиці.

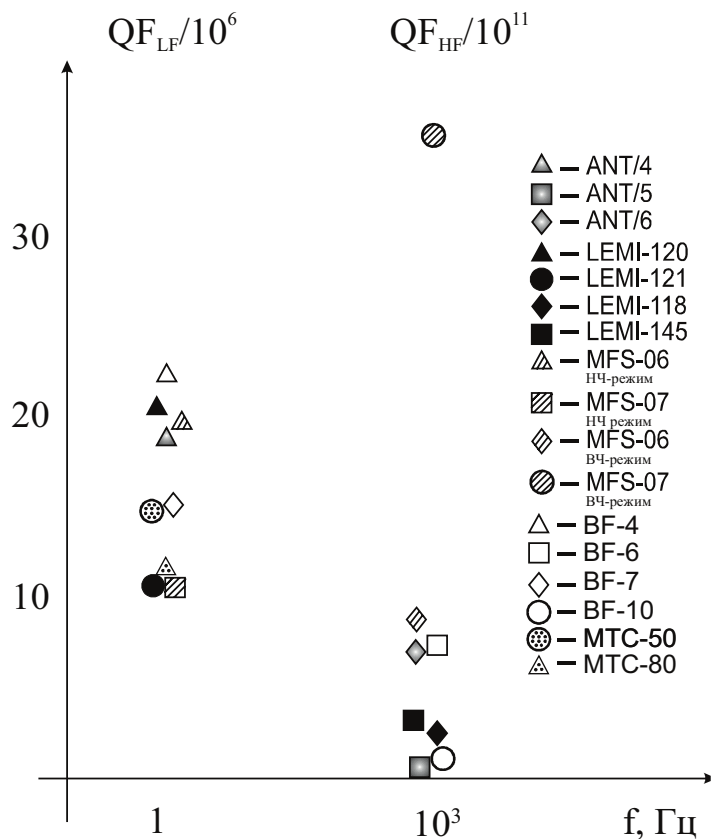


Рис. 3. Коефіцієнти якості ІМ

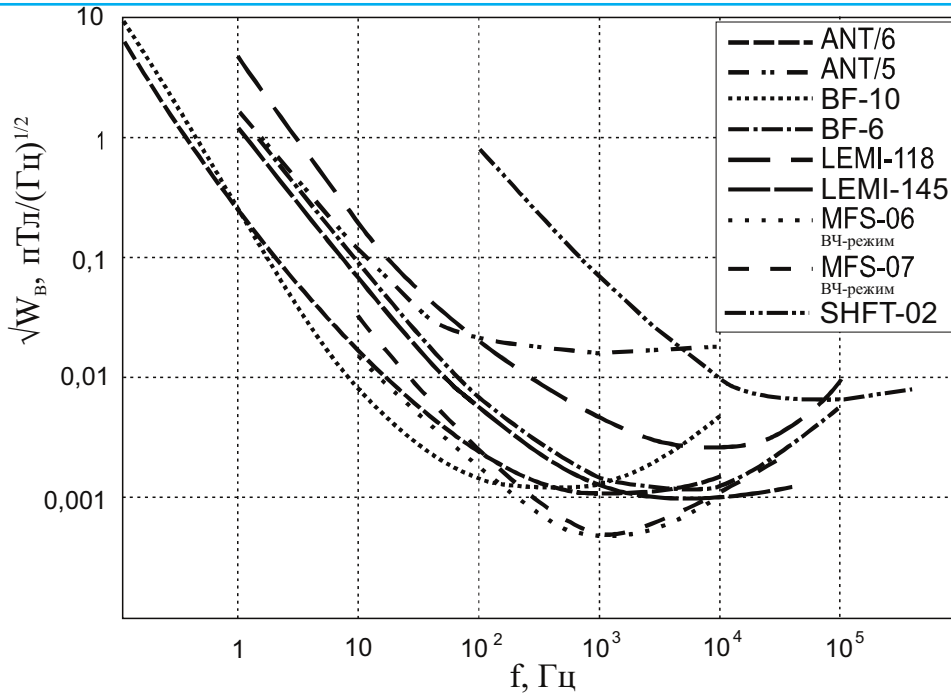


Рис. 4. Рівень власних шумів височастотних ІМ

Таблиця 2

Основні параметри кращих височастотних ІМ

ІМ	Частотний діапазон, Гц	Коефіцієнт перетворення на плоскій частині АЧХ, мВ/нТл	Довжина, м	Маса, кг	Поріг чутливості, нТл/(Гц) ^{1/2}	Посилання
BF-6	1...1·10 ⁵ 3 дБ (10...2,5·10 ⁴)	300	0,73	1,7	1·10 ⁻³ ...1 Гц 1,5·10 ⁻⁶ ...10 ³ Гц 8·10 ⁻⁶ ...10 ⁵ Гц	[5]
BF-10	0,1...1·10 ⁴ 3 дБ (0,2...1·10 ⁴)	300	1,42	7	2·10 ⁻⁴ ...1 Гц 1·10 ⁻⁵ ...10 Гц 1,5·10 ⁻⁶ ...10 ³ Гц	[5]
ANT/6	0,1...1·10 ⁴ 3 дБ (10...1·10 ⁴)	200	0,91	3,2	2·10 ⁻⁴ ...1 Гц 1·10 ⁻⁶ ...>200 Гц	[6]
ANT/5	0,25...1·10 ⁴	100	0,61	1,5	1,2·10 ⁻³ ...1 Гц 2·10 ⁻⁵ ...>60 Гц	[6]
MFS-06 (chopper off)	10...1·10 ⁴	200	1,15	9	5·10 ⁻⁷ ...1000 Гц	[7]
MFS-07 (chopper off)	10...5·10 ⁴ 3 дБ (32...5·10 ⁴)	640	0,8	6,1	5·10 ⁻⁷ ...1000 Гц	[8]
SHFT-02 (3-комп.)	1·10 ³ ...3·10 ⁵	50	0,17× ×0,19× ×0,17	5,5	5·10 ⁻⁵ ...10 ³ Гц 8·10 ⁻⁶ ...10 ⁴ Гц 6·10 ⁻⁶ ...10 ⁵ Гц	[11]
LEMI-118	1...7·10 ⁴ 3 дБ (20...7·10 ⁴)	40	0,85	1,7	5·10 ⁻³ ...1 Гц 5·10 ⁻⁶ ...10 ³ Гц	[12]
LEMI-145	4·10 ⁻² ...3·10 ⁴ 3 дБ (1...3·10 ⁴)	100	1,34	4	1,6·10 ⁻³ ...1 Гц 2·10 ⁻⁶ ...10 ³ Гц 1·10 ⁻⁶ ...10 ⁴ Гц	[13]

Список літератури

1. *Korepanov V.* New approach to the exact design of low noise search-coil magnetometers / V. Korepanov, R. Berkman // New measurements – challenges and visions: XIV ІМЕКО Word Congress, 1997: Proceedings. – Tampere, Finland, 1997. – Topic 4. – P. 103–108.
2. *Кандинская Л.* К расчету проницаемости сердечников для магнитных датчиков: информационно-технический бюллетень по геофизической аппаратуре / Л. Кандинская. – Л., 1958.
3. Аппаратура для аэрогеофизической разведки с магнитным и электромагнитным информационными каналами / А.А. Вакульский, Л. Я. Мизюк, Р. В. Проць, Ю. Ю. Сикачевский. – К.: Наукова думка, 1985. – 253 с.
4. Phoenix-geophysics. Sensors. Magnetic and Electric Field Sensors for Geophysical Receivers [Electronic source]. – 2011. – 2 P. – Режим доступу: http://www.phoenix-geophysics.com/products/sensors/sensors_specsheet.pdf.
5. Schlumberger. Magnetic Sensors [Electronic source]. – 2011. – Режим доступу: http://www.slb.com/about/rd/technology/emi/bf_sensor.aspx.
6. Zonge. Magnetic Sensors [Electronic source]. – 2011. – Режим доступу: <http://www.zonge.com/MagSensors.html>.
7. Metronix geophysics. Sensors. MFS-06 [Electronic source]. – 2011. – Режим доступу: <http://178.63.62.205/mtxgeo/index.php/sensors/mfs-06e>.
8. Metronix geophysics. Sensors. MFS-07 [Electronic source]. – 2011. – Режим доступу: <http://178.63.62.205/mtxgeo/index.php/sensors-2/mfs-07e>.
9. Lviv Center of Institute for Space Research. Induction Magnetometer for Geophysical Applications LEMI-120 [Electronic source]. – 2013. – Режим доступу: <http://www.isr.lviv.ua/lemi120.htm>.
10. Lviv Center of Institute for Space Research. Induction Magnetometer for Geophysical Applications LEMI-121 [Electronic source]. – 2013. – Режим доступу: <http://www.isr.lviv.ua/lemi121.htm>.
11. Metronix geophysics. Sensors. SHFT-02 [Electronic source]. – 2011. – Режим доступу: <http://178.63.62.205/mtxgeo/index.php/sensors-2/shft-02>.
12. Lviv Center of Institute for Space Research. Induction Magnetometer for LEMI-118 [Electronic source]. – 2013. – Режим доступу: <http://www.isr.lviv.ua/lemi118.htm>.
13. Lviv Center of Institute for Space Research. Induction Magnetometer for LEMI-145 [Electronic source]. – 2013. – Режим доступу: <http://www.isr.lviv.ua/lemi145.htm>.