

## ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ІНДУКЦІЙНОГО МАГНІТОМЕТРА ДЛЯ ПРОЕКТУ РЕЗОНАНС

**В.О. Проненко**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та НКА України



*Розглянуто особливості конструкції трикомпонентного індукційного магнітометра LEMI-606, що входить до складу наукової апаратури експерименту РЕЗОНАНС і призначений для вивчення флуктуацій вектора магнітного поля в частотному діапазоні 1...20000 Гц. Проведено розрахунок його параметрів та наведено експериментально отримані характеристики.*

*Three components induction magnetometer LEMI-606 is a part of the scientific equipment of RESONANCE experiment and is designed for the study of the magnetic field vector fluctuations in the frequency range 1...20000 Hz. In these papers the design features of this magnetometer and obtained experimentally characteristics are considered, and its parameters are calculated.*

### Вступ

Важливою галуззю застосування індукційних магнітометрів (ІМ) є космічні дослідження, спрямовані на вивчення навколосезного середовища та більш віддалених частин космосу. Необхідність магнітних вимірювань у космосі пов'язана з тим, що через переважно плазмовий склад і суттєву провідність іоносфери, магнітосфери й сонячного вітру практично всі процеси в цих областях керуються електричними струмами і, відповідно, їх магнітними полями, а також полями зовнішнього походження. Створення ІМ для кожного космічного експерименту є оригінальним завданням, оскільки кожного разу потрібно розробити ІМ з якомога нижчим порогом чутливості, який дозволив би виконати поставлене наукове завдання, та ще й в умовах додаткових обмежень маси, розміру і споживаної потужності. Практично всі супутники для магнітосферних експериментів мали на борту ІМ. Спочатку це були однокомпонентні прилади (експерименти “Космос”, “Інтербол”, GEOS-2, GEOTAIL), пізніше для отримання інформації про вектор магнітного поля почали використовувати трикомпонентні магнітометри (експерименти CLUSTER, DEMETER, THEMIS).

Експеримент РЕЗОНАНС, призначений для вивчення процесів у внутрішній магнітосфері нашої планети, входить у програму наукових космічних досліджень Росії з участю численних закордонних установ, у тому числі і Львівського центру Інститу-

ту космічних досліджень НАН та НКА України [1]. У цьому експерименті будуть запущені чотири супутники з метою дослідження взаємодії між хвилями й частками та моніторингу великомасштабних змін у магнітосфері, пов'язаних з геомагнітною активністю. Вимірювання магнітних полів має першорядне значення для цього проекту, оскільки його головною особливістю є те, що чотири супутники будуть запущені на спеціально розроблену так звану “магнітосинхронну” орбіту [2] і будуть досить довгий час знаходитися в одній магнітній силовій лінії. Для дослідження електромагнітних процесів до складу корисного навантаження експерименту введено хвильовий комплекс у складі приладу ELMAVAN – аналізатора електромагнітних хвиль, давачем змінного магнітного поля якого є трикомпонентний ІМ LEMI-606, розроблений для вивчення флуктуацій вектора магнітного поля в частотному діапазоні 1...20000 Гц.

Відомо, що параметри плазми швидко змінюються в просторі й часі, тому при одночасних вимірюваннях у чотирьох точках необхідно забезпечити високу часову роздільну здатність і якомога більшу ідентичність параметрів кожного з чотирьох ІМ, які будуть установлені і працюватимуть одночасно на чотирьох супутниках. Крім того, до конструкції магнітометра висувалися специфічні умови власне космічних апаратів експерименту РЕЗОНАНС: він повинен мати вигляд трикомпонентного моноблока із суттєво несиметричним розташуванням компонент. Ці вимоги були враховані при розробці магнітометра LEMI-606.

### Особливості конструкції магнітометра LEMI-606

Індукційний магнітометр LEMI-606 (рис. 1) складається із трьох компонент, закріплених на кубічному корпусі, який містить стабілізатор напруги та служить для встановлення магнітометра на штанзі супутника. Як видно із цього рисунка, компоненти закріплено на корпусі несиметрично, що суттєво відрізняє його від відомих конструкцій (наприклад, ІМ проекту THEMIS [3]).

Кожна компонента ІМ LEMI-606 складається із системи котушок – основної обмотки і обмотки зворотного зв'язку, намотаних на осердя, та попереднього підсилювача і побудована за схемою зі зворотним зв'язком по магнітному полю. Оскільки супутники експерименту РЕЗОНАНС значний час



Рис. 1. Індукційний магнітометр LEMI-606

будуть знаходитися в радіаційних поясах, постало завдання захистити попередній підсилювач від впливу радіації. Згідно з [4], радіаційна стійкість бортової апаратури повинна бути від 30 до 70 Гр за сумарною дозою, що дозволить застосувати компоненти індустриального виконання і значно зменшить вартість приладів. Необхідна величина стійкості приладів, при виконанні їх корпусу з алюмінію, досягається при товщині стінок, що дорівнює 5 мм [4]. Зрозуміло, що такий корпус має досить велику вагу і бажано зробити його якнайменшим. Як уже вказувалося, в корпусі, який встановлюється на штанзі супутника, розміщений блок живлення, а загальноприйняте розміщення в ньому ще й підсилювача, як, наприклад, в ІМ згаданого проекту THEMIS, суттєво збільшило б його розміри, а отже і вагу. Тому для проекту РЕЗОНАНС було запропоновано конструкцію ІМ, в якій магнітне осердя має вигляд пустотілої трубки і підсилювач розташований всередині, тобто від впливу радіації його захищає матеріал осердя та вимірювальної котушки. У такій конструкції осердя було виготовлено з набору поздовжніх феромагнітних стрічок з матеріалу 82К3ХСР, ізольованих одна від одної і відпалених у спеціальному контейнері для досягнення опуклої форми (рис. 2). Згідно з [5], закон послаблення потужності дози випромінювання однорідним захистом товщиною  $x$  для плоского моноспрямованого джерела має вигляд

$$D = D_0 \exp\{-\mu x\},$$

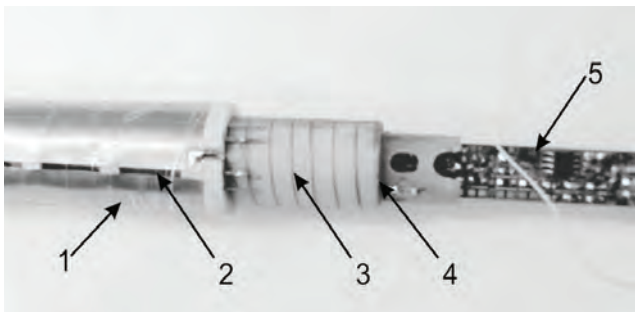


Рис. 2. Конструкція однієї компоненти магнітометра LEMI-606: 1 – електростатичний екран; 2 – основна обмотка; 3 – обмотка зворотного зв'язку; 4 – осердя; 5 – попередній підсилювач

де  $D_0$  – потужність дози випромінювання при нульовому захисті;  $D$  – потужність дози випромінювання після проходження шару поглинач товщиною  $x$ ;  $\mu$  – лінійний коефіцієнт послаблення;  $x$  – товщина шару захисту.

Звідси отримуємо, що 5 мм алюмінію забезпечує захист, еквівалентний 1,6 мм міді. У нашому випадку товщина обмотки вимірювальної котушки мідним дротом дорівнює 1,8 мм, що цілком достатньо для забезпечення належного рівня радіаційної стійкості.

Як уже згадувалося, особливістю описуваного магнітометра є несиметрична конструкція, пов'язана із загальною конструкцією супутника і умовами встановлення магнітометра на штангу, що викликало необхідність дослідити взаємний вплив компонент магнітометра в такій конструкції. Для цього треба було виконати калібрування LEMI-606 у зібраному вигляді, що створило серйозні проблеми при виборі достатньо великої трикомпонентної міри слабкого магнітного поля, яка мала б розмір ділянки рівномірного магнітного поля, більший за розмір зібраного магнітометра. Тому для калібрування було використано стенд лабораторії LPC2E/CNRS, Орлеан, Франція. Ця калібрувальна система працює в діапазоні частот 0...50000 Гц та забезпечує неоднорідність магнітного поля, не гіршу 1 %, в об'ємі кулі діаметром 0,5 м.

#### Амплітудно-частотна

#### та фазочастотна характеристики магнітометра

Виходячи із заданих параметрів ІМ, необхідно було передусім розрахувати його технічні характеристики. Відомо, що принцип дії ІМ полягає у використанні закону індукції Фарадея:

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

де  $e$  – ЕРС, яка виникає в котушці з кількістю витків  $n$  при появі змінного магнітного потоку  $\Phi$  уздовж її осі.

Якщо магнітний потік змінюється за законом  $\Phi = \Phi_{\max} \cdot \cos(\omega t)$ , де  $\omega$  – кругова частота, а всередині котушки встановлено осердя з матеріалу з високою магнітною проникністю, то амплітудне значення вихідної напруги ненавантаженого індукційного датчика (ІД) з таким осердям може бути подане у такий спосіб:

$$U_0 = \omega \cdot n \cdot \Phi_{\max} = \omega \cdot n \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_c \cdot H_c = G \cdot H_c;$$

де  $\mu_c$  – відносна магнітна проникність осердя;  $G$  – чутливість ІД,  $G = \omega \cdot n \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_c$ ;  $S$  – поперечний переріз осердя;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму;  $H_c$  – амплітудне значення вимірюваної напруженості зовнішнього магнітного поля.

Для подальших розрахунків використаємо еквівалентну схему ІМ зі зворотним зв'язком по магнітному полю, показано на рис. 3 [6], де прийнято такі позначення: ПП – попередній підсилювач;  $C_1$  – сума

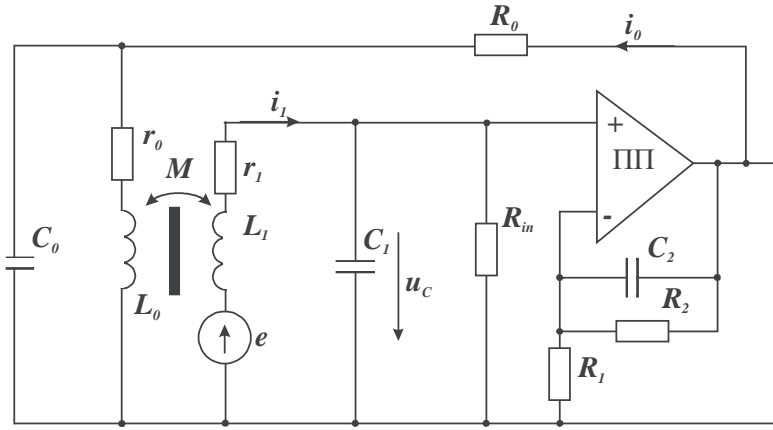


Рис. 3. Еквівалентна схема ІМ

власної ємності вимірювальної котушки і вхідної ємності ПП;  $e$  – ЕРС, яка наводиться в котушці  $L_1$  при вимірюванні зовнішнього змінного магнітного поля;  $L_0, r_0, C_0$  – індуктивність, опір та ємність котушки зворотного зв’язку;  $L_1, r_1$  – індуктивність та опір основної вимірювальної котушки;  $M$  – взаємна індуктивність основної вимірювальної котушки і котушки зворотного зв’язку,  $M = n_{зв} \sqrt{L_0 L_1}$ ;  $n_{зв}$  – коефіцієнт зв’язку;  $R_0$  – опір у колі загального зворотного зв’язку, який визначає величину струму зворотного зв’язку  $i_0$ ;  $R_1 R_2 C_2$  – коло, яке утворює зворотний зв’язок ПП;  $R_{in}$  – вхідний опір попереднього підсилювача ПП;  $u_{out}$  – вихідна напруга ІМ.

Вихідний сигнал основної обмотки подається до входу надмалощумлячого підсилювача ПП з частотозалежним зворотним зв’язком  $C_2 R_1 R_2$ , вихід якого через опір  $R_0$  з’єднаний з обмоткою зворотного зв’язку за магнітним потоком. Обидва зворотних зв’язки формують плоску частину передатної функції магнітометра у смузі частот 100...20000 Гц, у смузі частот 1...100 Гц вихідний сигнал пропорційний частоті сигналу. Для додаткового зменшення впливу завад вихідний сигнал сформований диференційним за допомогою інвертора (не показано на рис. 3).

Передатна функція еквівалентної схеми на рис. 3 описується таким рівнянням:

$$u_{out} = \left[ \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \left( 1 + j\omega \frac{R_1 R_2 C_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left( 1 - \omega^2 L_0 C_0 + j\omega \left( \frac{L_0}{R_0} + r_0 C_0 \right) \right) \right] / \left[ \left( 1 + \frac{r_1}{R_{in}} - \omega^2 L_1 C_1 + j\omega \left( \frac{L_1}{R_{in}} + r_1 C_1 \right) \right) \right] \times \left( 1 - \omega^2 L_0 C_0 + j\omega \left( \frac{L_0}{R_0} + r_0 C_0 \right) \right) \cdot \left( 1 + j\omega R_2 C_2 \right) + j\omega \frac{M(R_1 + R_2)}{R_0 R_1} \left( 1 - \omega^2 L_0 C_0 + j\omega \left( \frac{L_0}{R_0} + r_0 C_0 \right) \right) \times \left( 1 + j\omega \frac{R_1 R_2 C_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot e.$$

Візьмемо до уваги, що котушка зворотного зв’язку має дуже малу кількість витків, що дозволяє знехтувати її ємністю  $C_0$  і опором  $r_0$  внаслідок того, що ці величини

значно менші за інші, які входять до рівняння. Для кола зворотного зв’язку врахуємо, що опір зворотного зв’язку  $R_0$  значно перевищує імпеданс обмотки зворотного зв’язку  $\omega L_0$ . З урахуванням переліченого отримаємо

$$u_{out} = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + j\omega C_2 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{1 + j\omega C_2 R_2} \times \frac{1}{1 - \omega^2 \frac{L_1 C_1}{R_{in}} + j\omega \frac{r_1 C_1}{R_{in}}} \right) / \left( 1 + j\omega \frac{M}{R_0} \frac{1 + j\omega C_k (R_0 + R_k)}{1 + j\omega C_k R_k} \right) \times \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + j\omega C_2 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{1 + j\omega C_2 R_2} \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 \frac{L_1 C_1}{R_{in}} + j\omega \frac{r_1 C_1}{R_{in}}} \right) \cdot e. \quad (1)$$

На підставі цього виразу можемо побудувати динамічну модель ІМ зі зворотним зв’язком по магнітному полю (рис. 4).

Позначимо коефіцієнт підсилення підсилювача як  $k$ :

$$k = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + j\omega \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_2}{1 + j\omega R_2 C_2}.$$

Тоді з (1) отримаємо

$$u_{out} = \frac{k}{\left( 1 + \frac{r_1}{R_{in}} - \omega^2 L_1 C_1 \right) + j \left( \frac{\omega L_1}{R_{in}} + \omega C_1 r_1 + \frac{\omega M k}{R_0} \right)} \cdot e.$$

Оскільки котушка зворотного зв’язку розташована вздовж усієї вимірювальної котушки і близько від неї, можемо вважати коефіцієнт зв’язку  $n_{зв}$  рівним 1. Для двох обмоток, розташованих на одному осерді, індуктивність котушки зворотного зв’язку в такій конструкції визначається як

$$L_0 = L_1 \frac{n_0^2}{n^2},$$

де  $n_0$  – кількість витків котушки зворотного зв’язку;  $n$  – кількість витків вимірювальної котушки. Тоді

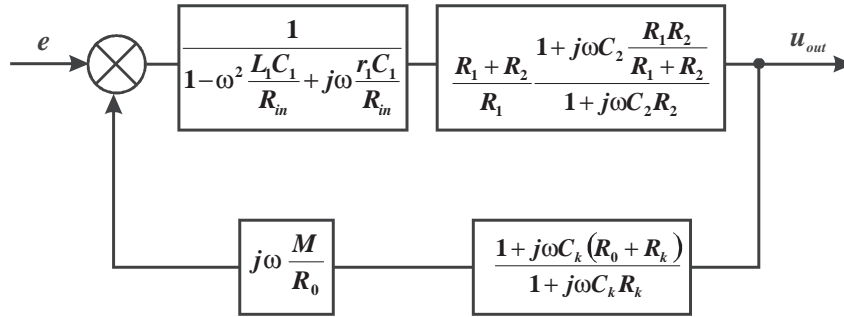


Рис. 4. Спрощена динамічна модель ІМ із замкненим зворотним зв'язком

взаємну індуктивність можна записати в такому вигляді:

$$M = L_1 \frac{n_0}{n}$$

Для складової вектора напруженості вимірюваного магнітного поля  $H_e$ , спрямованої вздовж осі вимірювальної котушки, ЕРС  $e$ , що наводиться, дорівнює [7]

$$e = -j\omega \cdot n \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_c \cdot H_e$$

З урахуванням наведеного вище рівняння, вираз (1) можна переписати в такому вигляді:

$$u_{out} = \frac{-j\omega \cdot k \cdot n \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_c}{\left(1 + \frac{r_1}{R_{in}} - \omega^2 L_1 C_1\right) + j\left(\frac{\omega L_1}{R_{in}} + \omega C_1 r_1 + \frac{\omega L_1 k n_0}{R_0 n}\right)} \times H_e = K \cdot H_e,$$

де  $K$  – коефіцієнт перетворення ІМ.

З останнього виразу, враховуючи, що  $L_1 C_1 = 1/\omega_r^2$ , де  $\omega_r$  – власна резонансна частота контуру, утвореного індуктивністю вимірювальної котушки і її сумарною ємністю, модуль коефіцієнта перетворення може бути поданий у вигляді

$$K = \frac{\omega \cdot k \cdot n \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_c}{\sqrt{\left(1 + \frac{r_1}{R_{in}} - \frac{\omega^2}{\omega_r^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega L_1}{R_{in}} + \omega C_1 r_1 + \frac{\omega L_1 k n_0}{R_0 n}\right)^2}}$$

Відповідно, зсув за фазою напруги  $u_{out}$  відносно вимірюваного магнітного поля становить

$$\varphi = \arctg \frac{1 + \frac{r_1}{R_{in}} - \frac{\omega^2}{\omega_r^2}}{\frac{\omega L_1}{R_{in}} + \omega C_1 r_1 + \frac{\omega L_1 k n_0}{R_0 n}}$$

Отримані вирази дозволили розрахувати амплітудно-частотну та фазочастотну характеристики розроблюваного ІМ. Ці параметри також перевірено експериментально при калібруванні ІМ, що описано нижче.

#### Поріг чутливості магнітометра LEMI-606

Найважливішим параметром ІМ є поріг чутливості, який визначається рівнем його шуму, приведеним до входу. Щоб обчислити цей рівень шуму,

звернемося до найповнішої еквівалентної шумової схеми ІМ, запропонованої в [8] і наведеної на рис. 5, де прийнято такі позначення:  $e$  – вихідна ЕРС давача;  $r_1$  – активний опір вимірювальної котушки (вважаємо, що всі опори не шумлять);  $R_h$  – втрати на гістерезис;  $R_F$  – втрати на вихрові струми;  $U_R$  – еквівалентна шумова напруга активної частини імпедансу давача з густиною потужності  $W_r$ ,  $W_r = 4kT(r_1 + R_h + R_F)$ ;  $C$  – власна ємність вимірювальної котушки;  $r$  – опір втрат у власній ємності вимірювальної котушки;  $I_r$  – активний струм втрат в ємності  $C$  з густиною потужності  $W_{lr}$ ;  $R_{in}$  – вхідний опір підсилювача;  $U_n$  і  $I_n$  – вхідні шумова напруга і струм попереднього підсилювача з густинами потужності  $W_{uamp}$  і  $W_{iamp}$  відповідно.

Згідно з рис. 5, результуюча густина шумів ІМ по потужності  $W$ , приведена до входу підсилювача, може бути подана у вигляді

$$W = W_r \cdot k_U^2 + W_{Uamp} + (W_{Iamp} + W_{lr}) \cdot Z^2,$$

де  $Z$  – імпеданс давача,

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

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

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

$k_U$  – передатна функція схеми,

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

Використовуючи визначення для чутливості давача  $G = U_0/H_e$ , отримаємо рівняння для густини шумової потужності у величинах вимірюваного магнітного поля  $W_B$ :

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

Попередній розрахунок рівня шумів за цією формулою показав, що для даної конструкції слід очікувати, що мінімальне значення рівня шумів на частоті 6 кГц дорівнює 5 фТл/Гц<sup>1/2</sup>. Експериментально виміряний рівень власних шумів магнітометра подано в наступному розділі.

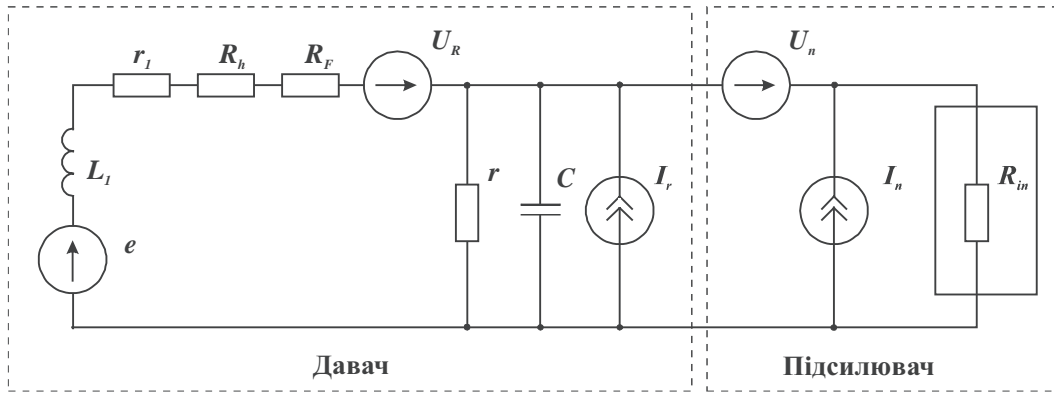


Рис. 5. Еквівалентна шумова схема ІМ

**Результати досліджень магнітометра LEMI-606**

За допомогою калібрувальної системи лабораторії LPC2E (Орлеан, Франція) проведено дослідження параметрів магнітометра у двох варіантах: із конструкцією, поданою на рис. 1, та із симетричною конструкцією, аналогічною ІМ для експерименту THEMIS [3]. Вихідний сигнал магнітометра зберігався у файлах електромагнітного аналізатора хвиль ELMAVAN, який має такі параметри [9]:

- кількість розрядів АЦП – 16;
- частота дискретизації – 200 кГц;
- смуга пропускання вхідного аналогового фільтра Баттерворта 8-го порядку – 50 кГц.

Експериментально отримані амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики магнітометра наведено на рис. 6 та 7. Як видно із цих графіків, тотожність параметрів компонент у робочій смузі частот цілком задовільна.

Порівняння взаємного впливу компонент при симетричній і несиметричній конструкції магнітометра проводилося таким чином: зібраний несиметрично магнітометр був розташований у центрі трикомпонентної калібрувальної системи, компоненти магнітометра – паралельно відповідним осям системи. Магнітне поле з частотою від 8 Гц до 20 кГц подавалося послідовно в кожну обмотку калібрувальної системи, при цьому сигнал вимірювався на виходах усіх трьох компонент магнітометра. Такі ж вимірювання були проведені для симетрично зібраного магнітометра. Отримані результати наведено на рис. 8.

Результати цих досліджень показали, що для симетричної конструкції взаємовплив компонент на частотах до 10 кГц не перевищує 4 %, у той час як для несиметричної конструкції ця величина досягає 10 %. Отже, значення взаємовпливу для обох конструкцій відрізняються несуттєво і можуть бути враховані при обробці даних вимірювань.

Були проведені також і вимірювання рівня власних шумів у тришаровому магнітному екрані лабораторії LPC2E. Отримані результати наведено на рис. 9. Видно, що отриманий мінімальний рівень шумів на ділянці 6...8 кГц – порядку 4...5 фТл – цілком збігся з розрахунковою величиною.

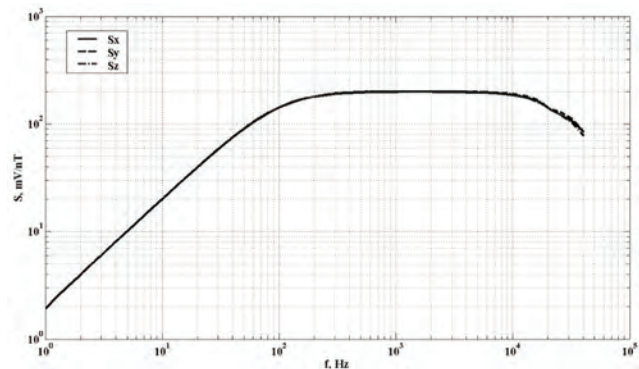


Рис. 6. Амплітудно-частотна характеристика трьох компонент магнітометра LEMI-606

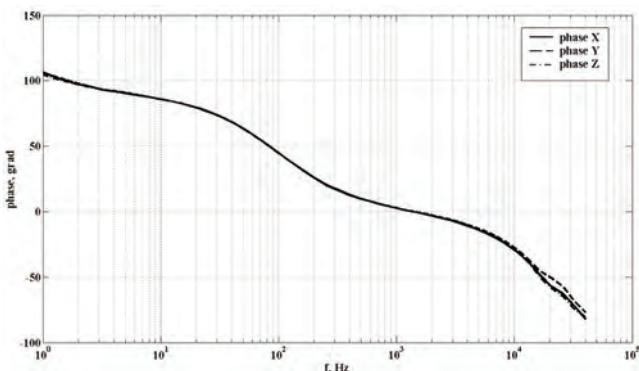


Рис. 7. Фазочастотна характеристика трьох компонент магнітометра LEMI-606

**Порівняння основних параметрів магнітометра LEMI-606 з кращими супутниковими індукційними магнітометрами**

Отримані результати експериментальних досліджень дозволяють порівняти основні параметри магнітометра LEMI-606 з кращими індукційними магнітометрами, які застосовуються останнім часом у космічних експериментах. На жаль, даних про взаємовплив для закордонних магнітометрів знайти не вдалося, тому порівняння проведено тільки за рівнем шумів у робочій смузі частот. Результати наведено в таблиці.

Як видно з таблиці, рівень чутливості магнітометра LEMI-606 не поступається кращим світовим зразкам. Деяке збільшення маси викликано необ-

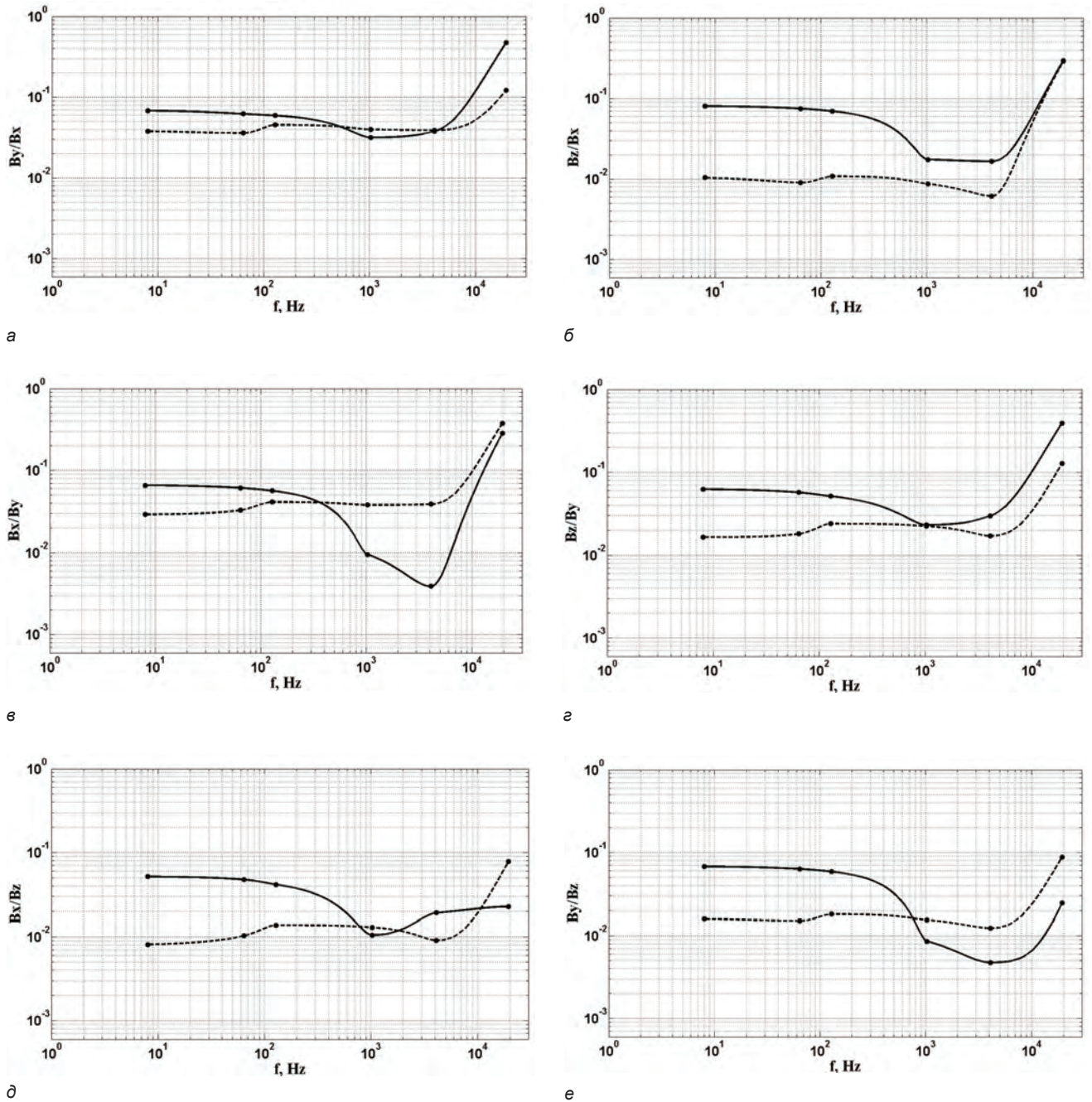


Рис. 8. Порівняння взаємного впливу компонент при симетричній (переривчаста лінія) і несиметричній (суцільна лінія) конструкціях магнітометра: а – вплив X компоненти на Y компоненту, магнітне поле вздовж осі X; б – вплив X компоненти на Z компоненту, магнітне поле вздовж осі X; в – вплив Y компоненти на X компоненту, магнітне поле вздовж осі Y; г – вплив Y компоненти на Z компоненту, магнітне поле вздовж осі Y; д – вплив Z компоненти на X компоненту, магнітне поле вздовж осі Z; е – вплив Z компоненти на Y компоненту, магнітне поле вздовж осі Z

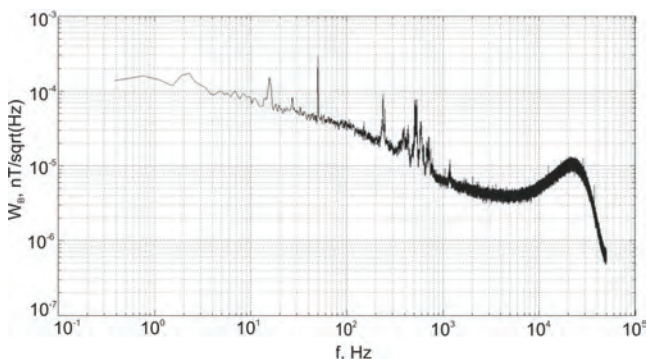


Рис. 9. Рівень власних шумів магнітометра LEMI-606

хідністю додаткового захисту електроніки від впливу радіації.

### Висновки

Розміщення попереднього підсилювача всередині пустотілого циліндричного осердя дозволило зменшити розмір і вагу магнітометра, а також забезпечило захист попереднього підсилювача від впливу радіації.

Амплітудно-частотні характеристики всіх трьох компонент магнітометра LEMI-606 є ідентичними в межах 1 %. Різниця між фазочастотними характеристиками не перевищує 2 градуси.

Технічні параметри магнітометра LEMI-606 та кращих супутникових індукційних магнітометрів

Експеримент	Частотний діапазон, Гц	Довжина, мм	Маса, г	Поріг чутливості, пТл/Гц <sup>1/2</sup>	Посилання
Double Star	8...10 000	250	135 (1 компонента, без електроніки)	3...10 Гц 5,6·10 <sup>-2</sup> ...1 кГц 5·10 <sup>-1</sup> ...10 кГц	[10]
DEMETER	1...20 000	180	130 (1 компонента, без електроніки)	1...10 Гц 2·10 <sup>-2</sup> ...1 кГц 4·10 <sup>-3</sup> ...6 кГц	[11]
THEMIS	0,1...4000	170	800 (3 компоненти і електроніка)	7,6·10 <sup>-1</sup> ...10 Гц 2,2·10 <sup>-2</sup> ...1 кГц	[3]
RESONANCE	1...20 000	360	1200 (3 компоненти і електроніка)	8·10 <sup>-1</sup> ...10 Гц 6·10 <sup>-3</sup> ...1 кГц 4·10 <sup>-3</sup> ...6 кГц	

Взаємний вплив компонент при несиметричній конструкції магнітометра в кілька разів більший на низьких частотах, порівняно з симетричною конструкцією, і одного порядку на вищих частотах. У робочому діапазоні на частотах до 10 кГц він менший ніж 10 %. Дані експериментальних досліджень показують, що отримані похибки знаходяться в межах допустимих.

Порівняння параметрів магнітометра LEMI-606 та кращих закордонних індукційних магнітометрів показує, що за рівнем шумів він не поступається цим приладам. Деяке збільшення маси викликано необхідністю застосування додаткового радіаційного захисту електроніки, оскільки орбіта супутників проекту РЕЗОНАНС буде тривалий час проходити в ділянці радіаційних поясів навколо Землі.

Роботу виконано при підтримці контракту з ДКАУ № 1-05/08.

#### Список літератури

1. RESONANCE project for studies of wave-particle interactions in the inner magnetosphere / M.M. Mogilevsky, L.M. Zelenyi, A.G. Demekhov [et al.] // Geophysical monograph series. – 2012. – Vol. 199. – P. 117–126.
2. Current problems in studies of magnetospheric cyclotron masers and new space project “Resonans” / A.G. Demekhov, V.Y. Trakhtengerts, M.M. Mogilevsky, L.M. Zelenyi // Adv. space res. – 2003. – Vol. 32, No 3. – P. 355–374.
3. The search coil magnetometer for THEMIS / A. Roux, O. Le Contel, C. Coillot [et al.] // Space science rev. – 2008. – Vol. 141. – P. 265–275.
4. ИЕЛУ.370200.001-ОТ “Космический аппарат “Резонанс”. Общие требования.
5. Радиохимия и химия ядерных процессов / под ред. А.Н. Мурина, В.Д. Нефедова, В.П. Шведова. – Л.: Госхимиздат, 1960. – 784 с.
6. Проненко В.О. Забезпечення стабільності індукційних магнітометрів / В.О. Проненко, Є.Ф. Васильєв // Український метрологічний журнал. – 2010. – № 4. – С. 21–24.
7. Мизюк Л.Я. Входные преобразователи для измерения напряженности низкочастотных магнитных полей / Л.Я. Мизюк. – Киев: Наук. думка, 1964. – 166 с.
8. Korepanov V. New approach to the exact design of low noise search-coil magnetometers / V. Korepanov, R. Berkman // New measurements – challenges and visions: XIV IMEKO word congress, 1997: Proceedings. – Tampere, Finland, 1997. – Topic 4. – P. 103–108.
9. Electromagnetic wave analyzer “ELMAVAN” / O. Santolik, I. Kolmasova, L. Uhli [et al.] // Multisatellite studies of the inner magnetosphere. Project Resonans: Proceedings of the conference – project meeting. – Kyiv, Sept. 19–21, 2012. – P. 40–48.
10. First results of low frequency electromagnetic wave detector of TC-2 / Double Star program / J.B. Cao, Z.X. Liu, J.Y. Yang [et al.] // Annales geophysicae. – 2005. – Vol. 23. – P. 2803–2811.
11. Séran H.C. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research / H.C. Séran, P. Ferreau // Rev. of science instrumentation. – 2005. – Vol. 76. – P. 044502-1–044502-10.