

## СУЧАСНІ НИЗЬКОПОРОГОВІ ІНФРАНИЗЬКОЧАСТОТНІ ІНДУКЦІЙНІ ДАВАЧІ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ НАДСЛАБКИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

© Нічога В.О., Дуб П.Б., Проненко В.О., 2008

Розглянуто технічні характеристики та результати випробувань нового низькопорогового інфранизькочастотного індукційного давача LEMI-120, розробленого в Львівському центрі Інституту космічних досліджень і Фізико-механічному інституті Національної академії наук України, який за своїми параметрами відповідає кращим зарубіжним зразкам, а за деякими з них, наприклад, за співвідношенням якість-ціна, істотно перевищує відомі зарубіжні взірці.

The technical characteristics and the test results of the new low-threshold low-frequency induction sensor LEMI-120 designed in the Lviv Centre of the Institute of Space Researches and Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine are considered. Its parameters correspond to that of the best foreign sensors and some parameters, such as, for example, quality-cost ratio, exceed the best world level.

### Вступ

У багатьох галузях науки і техніки для вимірювання надзвичайно слабких магнітних полів (менших, ніж 1 нТл) необхідні низькопорогові високочутливі давачі з порогом чутливості по полю  $1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-6}$  нТл·Гц<sup>-1/2</sup> у частотному діапазоні  $10^{-3} \div 10^3$  Гц. Такі давачі використовуються для визначення ефективності низькочастотних екранів, геофізичних досліджень, космічних експериментів, прогнозу землетрусів по електромагнітних провісниках, вимірювання магнітного поля біологічних об'єктів [1–5].

Вимірювання таких значень магнітних полів можливе за допомогою сучасних інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), найважливішою ланкою яких є давач магнітного поля, який здійснює лінійне і високоточне перетворення напруженості досліджуваного магнітного поля у проміжний параметр, наприклад, електричну напругу, яка потім легко піддається подальшому підсиленню, аналізу і опрацюванню в ІВС.

### 1. Структурна схема сучасних ІВС для вимірювання напруженості магнітних полів

На рис. 1 показано типову структурну схему сучасної ІВС [17, 18, 20]. Давач здебільшого являє собою конструктивно завершений пристрій, який розміщується безпосередньо біля досліджуваного об'єкта [1, 18, 19] і складається з первинного перетворювача (ПП) і вхідного підсилювача (ВП) (рис. 1). Вихід вхідної частини ІВС, тобто давача фізичної величини (рис. 1), може бути аналоговим або цифровим. В останньому випадку давач через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) можна під'єднати до мікропроцесора (МП), який оброблятиме інформацію, що надходить, і керуватиме всією ІВС, у тому числі засобами індикації, візуалізації та документування (тобто вихідного перетворювача).

Забезпечення високої якості давача – чи не найголовніша передумова отримання технічних, метрологічних і експлуатаційних характеристик сучасних ІВС. При цьому потрібно відзначити, що реалізація високих вимог до давача ІВС не може бути замінена оптимізацією параметрів вторинних

перетворювачів [1, 16, 17], які йдуть услід за давачем, тобто пристроїв підсилення фільтрації та опрацювання сигналу.

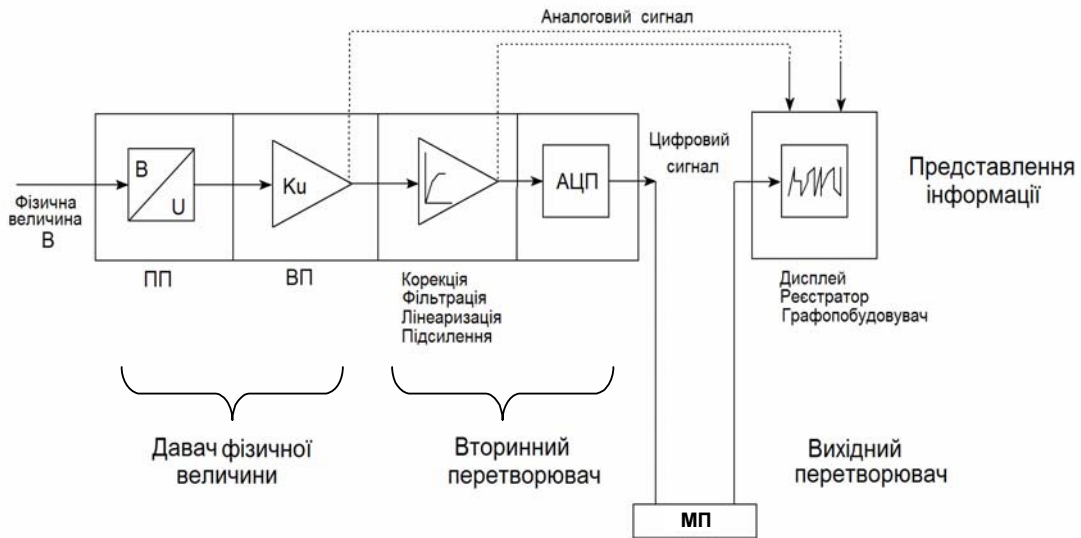


Рис. 1. Типова структурна схема інформаційно-виміральної системи

У зв'язку з цим усе, що стосується дослідження і розроблення давачів, у світовій науці виділилося в самостійний науковий напрям, який посідає одне з провідних місць і навіть отримав окрему назву – «сенсорики» [18]. На думку японських вчених, той «хто тримає під своїм контролем давачі, визначає рівень всієї системи» [17].

Вищезгадане дає змогу з упевненістю стверджувати, що розроблення і створення давачів різних фізичних величин залишається одним з найважливіших завдань сучасної науки і техніки.

У роботі розглянуто технічні характеристики та результати випробувань нового низькопорогового інфранизкочастотного індукційного давача LEMI-120, розробленого у Львівському центрі Інституту космічних досліджень і Фізико-механічному інституті Національної академії наук України, який за своїми параметрами відповідає кращим зарубіжним зразкам, а за деякими з них, наприклад, за співвідношенням якість-ціна та рівень власних шумів, істотно перевищує відомі зарубіжні взірці.

## 2. Основні типи давачів, які застосовують для вимірювання надслабких магнітних полів

Вимірювання надслабких магнітних полів є актуальним в прикладній геофізиці, бортових космічних експериментах, медико-біологічних дослідженнях, неруйнівному контролі та технічній діагностиці, розв'язанню задач електромагнітної сумісності і контролю побічного електромагнітного випромінювання приладів та систем.

Стосовно частотного діапазону  $10^{-3} \div 10^3$  Гц під час вимірювання магнітних полів з напруженістю, меншою, ніж 1 нТл, між собою можуть конкурувати ферозондові (fluxgate), надпровідникові (SQUID) та індукційні (induction coil) давачі (ІД) [1].

Одним з основних параметрів, за яким можна порівнювати давачі для вимірювання магнітних полів, є поріг чутливості по магнітному полю  $B_{пор}$  або рівень густини еквівалентного шумового поля (magnetic field noise) в заданому діапазоні частот.

На рис. 2 і 3, які запозичені з [15], представлені частотні характеристики спектральної густини шуму трьох сучасних магнітометрів з ферозондовим давачем (Fluxgate MAG-03), високо-температурним надпровідниковим давачем (HTS dc-SQUID) та індукційним давачем (Induction coil MFS 05).

У табл. 1 [15] наведено техніко-економічні параметри згаданих вище магнітометрів, частотні області раціонального використання та найменші значення досягнутого порога чутливості датча всередині вказаного частотного діапазону.

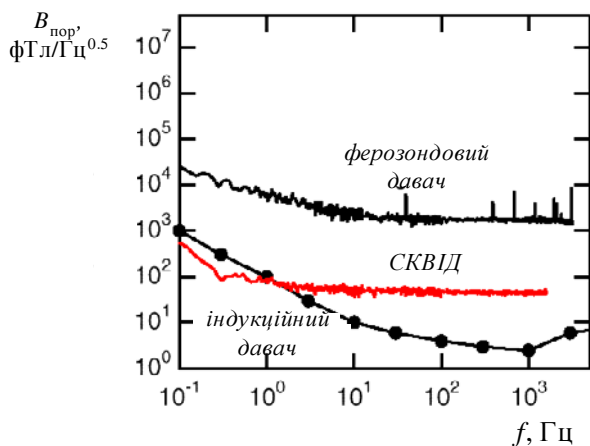


Рис. 2. Рівень густини еквівалентного шумового поля для трьох датчачів під час вимірювань в екрані

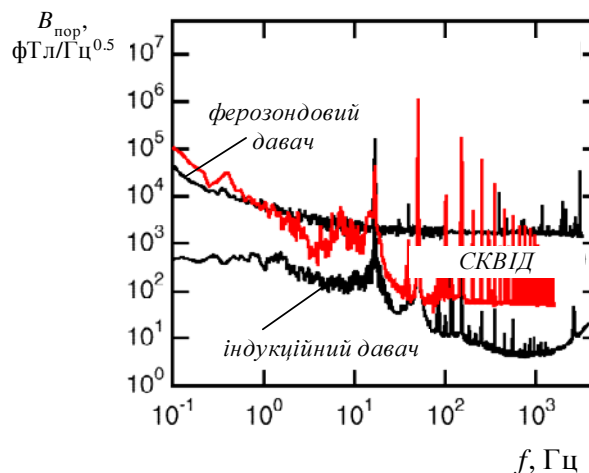


Рис. 3. Рівень густини еквівалентного шумового поля для трьох датчачів під час вимірювань у сільській місцевості без екрана

Таблиця 1

**Порівняльні техніко-економічні характеристики основних типів сучасних датчачів для вимірювання надслабких магнітних полів**

Датчач	Частотний діапазон, Гц	Шум, фТл/Гц <sup>0.5</sup>	Розміри датчача, см	Маса датчача, кг	Вартість датчача, \$
Високотемпературний надпровідниковий датчач (СКВІД)	0.1 ÷ 10000	45	1×1×0.1	1	20000
Індукційний датчач MFS05	10 ÷ 10000	4	14×14×100	14	6000
Ферозондовий датчач MAG-03	0 ÷ 10000	1750	1×1×1	0.5	1200

Аналіз рис. 1 і табл. 1 дає змогу зробити такі висновки:

1. Реалізація порога чутливості менше ніж  $1 \cdot 10^{-3}$  нТл·Гц<sup>-1/2</sup> по полю в досліджуваному діапазоні частот можлива лише за допомогою надпровідникових (СКВІД – SQUID) і індукційних сенсорів.

2. На частотах вище 1 Гц перевага на боці індукційних сенсорів як по порогу чутливості, так і за вартістю, хоча геометричні розміри самого первинного перетворювача СКВІД-датчача істотно менші. У той самий час, враховуючи всю систему забезпечення «життєдіяльності» СКВІД-датчача разом з системою охолодження рідким гелієм або азотом, фактичні розміри СКВІД-датчача будуть істотно більшими як по загальних розмірах, так і по вазі.

3. З точки зору мобільності датчача і можливості роботи в польових умовах і автономності тривалої роботи перевага є на боці індукційних датчачів.

4. Враховуючи вищезгадане, а також незначну перевагу СКВІД-датчачів на частотах, менших від 1 Гц, для роботи в діапазоні  $10^{-3}$  ÷  $10^3$  Гц перевагу слід надавати індукційним датчачам.

Аналогічні висновки наведені в [1, 20, 30].

### **3. Технічні характеристики і параметри сучасних феромагнітних індукційних давачів**

Дослідження з удосконалення технічних характеристик ІД інтенсивно ведуться в багатьох країнах [1–14, 16, 20–24, 29], оскільки питання реалізації порога чутливості по полю нижче за 1 пТл на частотах, нижчих за 1 Гц і 1 фТл, на частотах, вищих за 10 Гц, дуже актуальні під час розв'язання багатьох задач. Однак розв'язання згаданих задач має зміст за обмежених малогабаритних характеристик, оскільки в протилежному випадку втрачається практична доцільність використання таких ІД через неприйнятні експлуатаційні і технологічні характеристики.

На наш погляд, враховуючи наявний досвід, побудова компонентних (зокрема, трикомпонентних) давачів для польових геофізичних досліджень (наприклад, для електророзвідки нафти, газу і твердих корисних копалин) можлива і доцільна, якщо давач у просторі займає об'єм, не більший за 1 м<sup>3</sup> від загальної маси усіх трьох компонент не більше 30 кг, що відповідає в перерахунку на одну компоненту лінійному розміру до 1 м і масі до 10 кг.

Однокомпонентні ІД з феромагнітним осердям для тих самих цілей [1, 9], які мають жорстку конструкцію, доцільно виконувати за лінійного розміру до 1,5 м і маси до 10 кг, а однокомпонентні рамочні ІД, які мають гнучку конструкцію [12, 16, 20], – за лінійного розміру до 10 м і маси до 30 кг. При цьому під лінійним розміром розумітимемо діаметр або довжину діагоналі відповідно круглої або квадратної рамки, або довжину ІД з феромагнітним осердям. Під масою ІД розумітимемо насамперед масу рамки по міді або масу міді і осердя феромагнітних ІД з лінійним осердям.

Побудова свердловинних трикомпонентних індукційних давачів для геофізичних досліджень, на наш погляд, можлива під час використання давачів з феромагнітним осердям (вимірювання поздовжніх компонент магнітного поля) і рамочних ІД (вимірювання поперечних до осі феромагнітного ІД) компонент магнітного поля. Остаточні малогабаритні характеристики ІД визначаються конкретними задачами вимірювань, об'єктом досліджень і габаритними розмірами, наприклад, вимірювальної платформи або свердловинного снаряда.

Наведені в табл. 2 технічні характеристики сучасних ІД з феромагнітним осердям [30] загалом випадку слід вважати оцінковими, особливо, що стосується такого параметра, як поріг чутливості  $B_{\text{пор}}$  (Magnetic Field Noise), оскільки більшість розробників і виготовлювачів давачів приводять значення  $B_{\text{пор}}$ , яке отримане теоретично або в екрані. При цьому не обумовлюються параметри вхідних підсилювачів давачів, використана елементна база і умови метрологічних випробувань. Крім того, часто досягнуті значення параметрів носять характер реклами.

### **4. Низькопороговий індукційний давач LEMI-120**

Низькопороговий індукційний давач LEMI-120 [9] призначений для вимірювання надслабких магнітних полів в діапазоні 0,0001...1000 Гц. Надзвичайно висока чутливість забезпечує високе співвідношення сигнал/шум. Індукційний давач складається з первинного перетворювача у вигляді індукційної котушки та блока електроніки, які розміщені разом в герметичному захисному корпусі. Магнітне осердя зроблене з великої кількості ізолюваних одна від одної стрічок з аморфного пермалою, які знаходяться в захисній трубці. Зовнішній вигляд давача LEMI-120 показано на рис. 4.

Основні технічні характеристики індукційного давача наведено в табл. 2, в якій для порівняння подано параметри інших конкурентоспроможних індукційних давачів. LEMI-120 складається з феромагнітного індукційного перетворювача та попереднього підсилювача, розташованих у герметичному корпусі завдовжки 1380 мм і діаметром 90 мм. Переріз осердя – 12x12 мм. Довжина осердя – 1200 мм. Котушка первинного перетворювача давача W2 (рис. 5) складається з 55000 витків провoda діаметром 0,07 мм, розміщених у 20 секціях. Котушка зворотного зв'язку W1 (рис. 5) складається зі 100 витків. Опір обмотки ІД на постійному струмі становить 4300 Ом. Індуктивність обмотки – 1100 Гн. Власна резонансна частота – 425 Гц.

**Технічні характеристики деяких сучасних давачів  
з феромагнітними індукційними перетворювачами**

№ з/п	Тип сенсора	Частотний діапазон, Гц	Чутливість	Габарити, м	Маса, кг	Поріг чутливості, нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$	Організація (фірма)-виробник	Примітка, література
1	МТС-30	$1 \cdot 10^{-1} \div 1 \cdot 10^4$ 3 дБ ( $1 \cdot 10^1 \div 1 \cdot 10^4$ )	200f мВ/нТл (0,1÷1 Гц) 200 мВ/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=0,75; d=0,09	8	$1 \cdot 10^{-1}$ на 0,1 Гц $7 \cdot 10^{-3}$ на 1 Гц $2 \cdot 10^{-5}$ на $10^2$ Гц $1 \cdot 10^{-6}$ на $10^3$ Гц	Phoenix Geophysics	геофізичний давач [8]
2	МТС-50	$2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^2$ 3 дБ (0,2÷10)	5f В/нТл (лінійна АЧХ) 1 В/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=1,41; d=0,06	10,5	$1 \cdot 10^{-1}$ на $10^{-3}$ Гц $2 \cdot 10^{-3}$ на 0,1 Гц $3 \cdot 10^{-4}$ на 1 Гц $1 \cdot 10^{-4}$ на $10^2$ Гц	Phoenix Geophysics	геофізичний давач [8]
3	BF-4	$1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^3$ 3 дБ (0,2÷500)	0,3 В/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=1,42; d=0,06	7,9	$2 \cdot 10^{-1}$ на $10^{-3}$ Гц $7 \cdot 10^{-4}$ на 0,1 Гц $8 \cdot 10^{-5}$ на 1 Гц $2 \cdot 10^{-5}$ на $10^3$ Гц	EMI Technology Center	геофізичний давач [27]
4	BF-6	$1 \div 1 \cdot 10^5$ 3 дБ ( $10 \div 2,5 \cdot 10^4$ )	0,3 В/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=0,73; d=0,05	1,7	$1 \cdot 10^{-3}$ на 1 Гц $8 \cdot 10^{-6}$ на $10^2$ Гц $1 \cdot 10^{-6}$ на $10^3$ Гц	EMI Technology Center	геофізичний давач [27]
5	BF-7	$1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^3$ 3 дБ (0,2÷500)	0,3 В/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=1,04; d=0,06	7,0	1 на $10^{-3}$ Гц $1,1 \cdot 10^{-3}$ на 0,1 Гц $1 \cdot 10^{-4}$ на 1 Гц $3 \cdot 10^{-5}$ на $10^2$ Гц	EMI Technology Center	геофізичний давач [27]
6	BF-10	$1 \cdot 10^{-1} \div 1 \cdot 10^4$ 3 дБ ( $0,2 \div 1 \cdot 10^4$ )	0,3 В/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=1,42; d=0,06	7,9	$8 \cdot 10^{-3}$ на 0,1 Гц $2 \cdot 10^{-4}$ на 1 Гц $1,1 \cdot 10^{-6}$ на $10^2$ Гц $8 \cdot 10^{-6}$ на $10^4$ Гц	EMI Technology Center	геофізичний давач [27]
7	MP-3M	$5 \div 25 \cdot 10^3$ 3 дБ ( $5 \div 22 \cdot 10^3$ )	0,2 В/нТл (плоска АЧХ)	0,25×0,25×0,2	0,9	$2,3 \cdot 10^{-5}$ на 250 Гц $3 \cdot 10^{-6}$ на 2 кГц $2 \cdot 10^{-6}$ на 10 кГц $4 \cdot 10^{-6}$ на 20 кГц	ФМІ НАН України	трикомпонентний космічний давач [2]
8	Kaskad	$1 \div 1 \cdot 10^5$ 3 дБ ( $7 \cdot 10^2 \div 9 \cdot 10^4$ )	0,1 В/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=0,3; d=0,01	0,2	0,1 на 1 Гц $1 \cdot 10^{-5}$ на 700 Гц $5 \cdot 10^{-6}$ на 5 кГц $6 \cdot 10^{-6}$ на 50 кГц	ФМІ НАН України	космічний давач [4]
9	ANT/4	0.0005÷1000	0.0005÷0.3 Hz (лінійна АЧХ) 100 мВ/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=1,38; d=0,048	6,2	0,2 на $10^{-3}$ Гц $1 \cdot 10^{-3}$ на $10^{-1}$ Гц $1 \cdot 10^{-4}$ на 1 Гц $2 \cdot 1 \cdot 10^{-5}$ на 10 Гц $2 \cdot 10^{-5}$ на $10^3$ Гц	Zonge Engineering and Resaerch Organization	геофізичний давач [26]
10	LEMI-120	$1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^3$ 3 дБ (1÷1000)	200f мВ/нТл (лінійна АЧХ) 200 мВ/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=1,2; d=0,09	7,5	1,5 на $10^{-4}$ Гц $1 \cdot 10^{-3}$ на 0,1 Гц $1 \cdot 10^{-4}$ на 1 Гц $1 \cdot 10^{-5}$ на 10 Гц $8 \cdot 10^{-6}$ на 100 Гц $2 \cdot 10^{-5}$ на 1000 Гц	ЛЦ ІКД НАН України (з участю ФМІ НАН України)	геофізичний давач [9]
11	MFS-06	$2 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^4$ ( $2 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^2$ з В33 і $10 \div 1 \cdot 10^4$ без В33)	0,2f В/нТл (при f<4 Гц) 0,2 В/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=1,25; d=0,075	8,5	$1 \cdot 10^{-2}$ на $10^{-2}$ Гц $1 \cdot 10^{-4}$ на 1 Гц $1 \cdot 10^{-6}$ на 1000 Гц	Metronix	геофізичний давач [11]
12	Сенсор апаратури АКФ	$1 \div 4 \cdot 10^3$ 3 дБ ( $10 \div 4 \cdot 10^3$ )	5 f мВ/нТл (лінійна АЧХ) 50 мВ/нТл (плоска АЧХ)	циліндр l=1,1; d=0,11	6,8	$37 \cdot 10^{-6}$ на 10 Гц $2 \cdot 10^{-6}$ на $10^3$ Гц	ЭКОТЕХ РАН	геофізичний давач [28]



Рис. 4. Зовнішній вигляд давача LEM1-120 під час випробувань на полігоні "Майдан"

Структурну схему індукційного давача LEM1-120 показано на рис. 5.

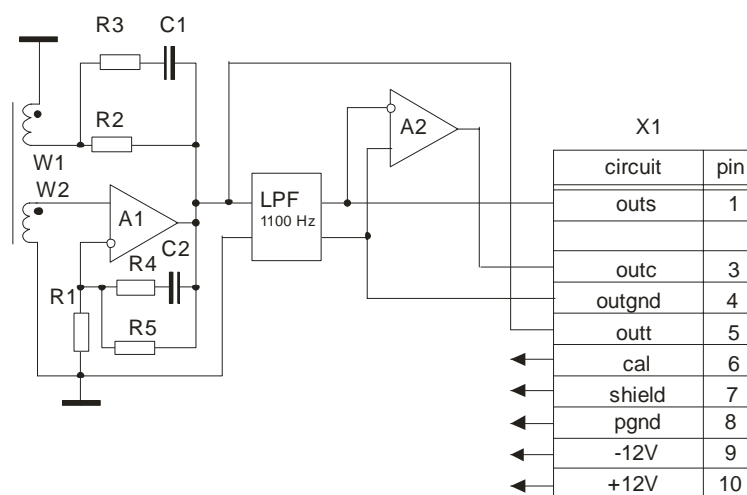


Рис. 5. Спрощена функціональна схема індукційного давача LEM1-120

Вихідний сигнал основної котушки W2 надходить на вхід малошумного підсилювача A1. Петля зворотного зв'язку R1R4R5C2 підсилювача A1 забезпечує коефіцієнт підсилення на низьких частотах, що приблизно дорівнює 200. Вихід підсилювача через коло корегування R2R3C1 з'єднаний з обмоткою зворотного зв'язку по магнітному потоку W1. Магнітна і місцева петлі зворотного зв'язку формують плоску частину амплітудно-частотної характеристики індукційного давача в діапазоні частот від 1 до 1000 Гц.

Вихід підсилювача A1 з'єднаний з ФНЧ (LDF) 6-го порядку (частота зрізу 1100 Гц) з коефіцієнтом підсилення, що дорівнює 10. Симетрична вихідна напруга формується інвертором A2.

Підсилювач A1 використовує принцип модуляції-демодуляції (МДМ). Опрацювання вхідних сигналів проходить в три етапи:

- модуляція високочастотного сигналу ( $f_m=6000$  Гц) вхідним низькочастотним сигналом;
- підсилення модульованого високочастотного сигналу;
- демодуляція цього модульованого сигналу.

Шум підсилювача A1 –  $4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Але, як і кожен МДМ-підсилювач, він чутливий до всіх сигналів у смузі  $\pm 1000$  Гц навколо частот  $n \cdot f_m$ . Індукційний давач LEM1-120 подавляє ці сигнали на 40 дБ.

Натурні випробування індукційного давача LEMI-120 проводилися в два етапи: спочатку на полігоні “Майдан” біля Львова і, пізніше на Волинському полігоні ФМІ НАНУ (урочище Пасіка, біля села Замлиння).

Під час вимірювання шумів на полігоні “Майдан” два однакові індукційні давачі LEMI-120 встановлювались в ямі завглибшки до 0,5 м, дно якої було засипане піском (рис. 6).



Рис. 6. Розташування індукційних давачів під час вимірювання шумів

Сигнали з двох давачів надходять на аналоговий віднімач, який реалізований на основі інструментального підсилювача. При цьому зовнішні сигнали віднімаються, а на АЦП надходить „шумовий” сигнал індукційних давачів, який записується портативним комп'ютером ПК. Схему увімкнення двох LEMI-120 під час вимірювання шумів показано на рис. 7.

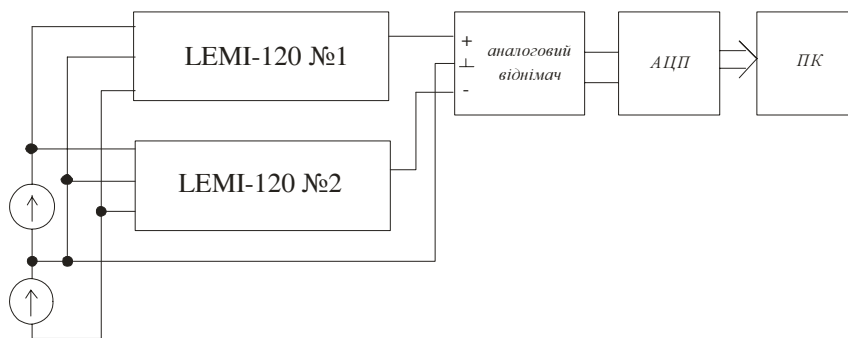


Рис. 7. Схема вимірювань власних шумів LEMI-120

Результати обробки результатів вимірювань показано на рис. 8.

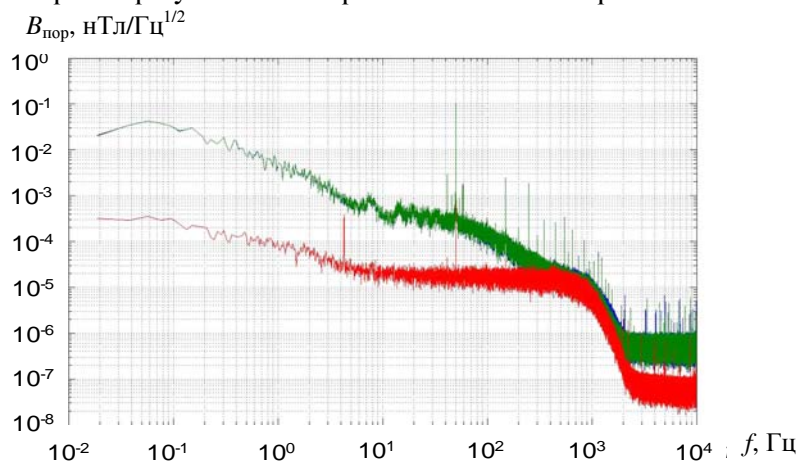


Рис. 8. Результати вимірювань: верхня крива – спектр зовнішніх (природних) сигналів кожного з давачів (на рисунку вони практично збігаються); нижня крива – спектр власних шумів LEMI-120



На рис. 9 показано усереднені результати вимірювань природних шумів на полігоні “Майдан” і теоретично отриманий поріг чутливості індукційних давачів LEMI-120.

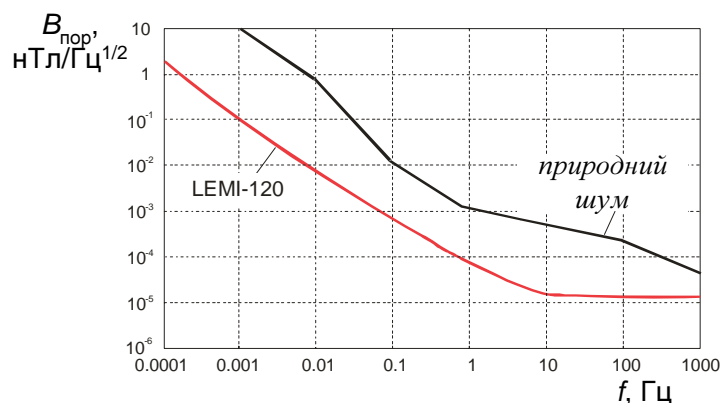


Рис. 9. Розрахунковий поріг чутливості та рівень природних шумів давача LEMI-120 на полігоні “Майдан”

### 5. Полігонні випробування індукційного давача LEMI-120

Другий етап полігонних випробувань індукційного давача LEMI-120 проводився на Волинському полігоні Фізико-механічного інституту НАН України. Місце цього полігону було ще в 1978 р. вибрано шляхом численних вимірювань спектрів природних шумів у частотному діапазоні 0,1...10<sup>5</sup> Гц. Спочатку вибір місця полігону вибирався по карті, як місце, що найбільш віддалене від населених пунктів з промисловими установками силової мережі з частотою 50 Гц. Було обстежено десятки можливих районів розташування майбутнього полігону у Львівській та Волинській областях. Для оцінки рівня шумів та завад використовувалися рамкові та феромагнітні індукційні давачі, які під'єднувалися до аналізаторів спектра. Внаслідок проведених робіт остаточним місцем розташування полігону було вибрано урочище Князь Багно, ділянка Пасіка на відстані 10 км від села Замлиння Любомльського району Волинської області. Ця місцевість характеризується найнижчим рівнем природних шумів та індустриальних завад порівняно з іншими обстеженими районами.

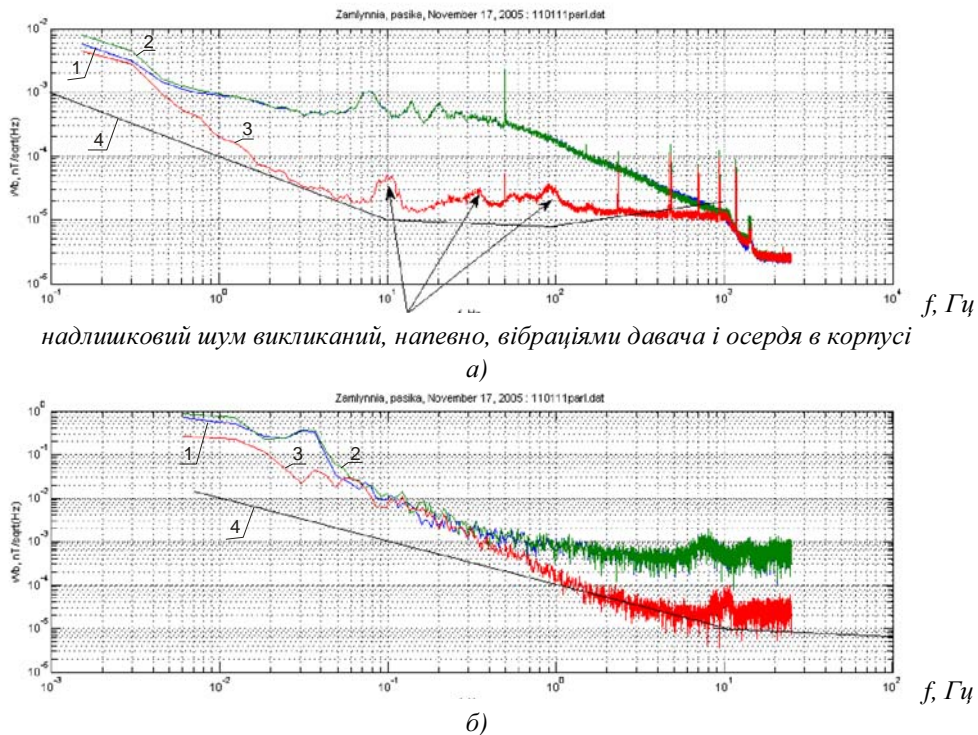


Рис. 10. Переміщення індукційного давача в екран для вимірювання шумів

Додатковий контроль власних шумів давачів в умовах Волинського полігону проводився шляхом поміщення LEMI-120 у феромагнітний екран, виготовлений зі сталеві труби від магістрального газопроводу. Діаметр труби – 1,5 м, довжина труби – 5 м. Труба закопана вертикально в землю. Давач LEMI-120 під час вимірювань розміщався в нижній частині труби на віддалі 4 м від верхньої кришки. Фрагмент цих вимірювань показано на рис. 10.



Результати запису шумів індукційного давача LEMI-120 на Волинському полігоні показано на рис. 11.



надлишковий шум викликаний, напевно, вібраціями давача і осердя в корпусі  
а)

б)  
Рис. 11. Результати вимірювань: а – в частотному діапазоні  $10^{-1} - 10^3$  Гц;  
б – в частотному діапазоні  $10^{-2} - 10^2$  Гц

Дві верхні криві 1 і 2 на рис. 11, а і 11, б – спектр природних шумів, записаний двома однаковими давачами LEMI-120. Із запису сигналів зрозуміло, що записані завади незначно відрізняються на частотах 0,2...1 Гц (крива 1 і 2). Крива 3 – спектр власних шумів LEMI-120, що відповідає запису шумів двох зустрічно включених давачів. Крива 4 – це теоретично розраховані шуми давача LEMI-120.

### Висновки

З проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

1. Для побудови широкосмугових низькопорогових ІВС вимірювання магнітних полів у діапазоні частот з порогом чутливості  $1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-6}$  нТл·Гц<sup>-1/2</sup> перевагу потрібно віддати індукційним давачам.

2. Індукційний давач LEMI-120 має технічні характеристики, які відповідають характеристикам найкращих в світі давачів, які розроблені для цих цілей.

3. Подальше вдосконалення низькопорогових широкосмугових індукційних давачів пов'язане з використанням новітніх магнітних матеріалів [25], зниженням шумів вхідних підсилювачів та індуктивності котушки давача.

1. Nichoga V.A. Измерение весьма слабых низкочастотных магнитных полей в геофизических и космических исследованиях // Отбор и передача информации. – 1993. – Вып. 9. – С.70–77. 2. Nichoga V., Gontar I., Dub P. Three-component Wide-band Low-frequency Magnetic Antenna for Diagnostics of Magnetic Fields in Outboard Space // Proceedings of 5th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service (TELSIKS'2001), Nis, Yugoslavia, 19–21 September. – 2001. – Vol.2.– P. 657–660. 3. Grudzinski E., Rozwalka K., Nichoga V., Dub P. Analysis of Requirement and Peculiarities of Design of Electromagnetic Field Sensors when Using Them for People Life and Health Protection // Proceedings of the II International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application

(IDAACS'2003), Lviv, Ukraine, September 8–10. – 2003. – P.473–476. 4. Nichoga V., Dub P., Sopilnyk L., Trokhym G., Grudzinski E. Usage of Information-Measuring System «Kaskad» for Diagnostics of Electromagnetic radiation of Some Objects // *Proceedings of International Conference on Modern of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2004)*. – P.536–539, Lviv–Slavsko, Ukraine, February 24–28. – 2004. 5. Nichoga V., Dub P., Sopilnyk L., Grudzinski E. Peculiarities of Measuring Low-Frequency Magnetic Fields in Moving Objects Closed Electrically // *Proceedings of the Seventeenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC'2004)*. – P.254–259, Wroclaw, Poland, June 29 – July 1, 2004. 6. Korepanov V., Berkman R., Rakhlin L., Klymovych Ye., Prystai A., Marussenkov A., Afanassenko M. Advanced Field Magnetometers Comparative Study, *Measurements* 29. – 2001. – S.137–146. 7. Korepanov V., Berkman R. New Approach to the Exact Design of Low-nois Coil Magnetometers, *Proceedings of the XIV IMECO World Congress. New Measurements – Challenges and Vision, Finland, Topic 4, IVA*. – 1997. – P.103–108. 8. *Field Sensors Magnetic and Electric, Practical Design for Optimum Productivity*, Phoenix Geophysics Limited 2001, p.2. 9. *Induction Coil Magnetometer LEMI-120, Technical Description and Operating Manual*, National Academy of Sciences of Ukraine, National Space Agency of Ukraine, Lviv Centre of Institute of Space Research, Lviv, 2005, 9 p. 10. Гонтар И.М., Мизюк Л.Я., Проць Р.В. Широкополосные индукционные преобразователи напряженности магнитного поля с постоянной чувствительностью в диапазоне частот // *Отбор и передача информации*. – К.: Наукова думка, 1983. – Вып.68. – С. 74–80. 11. U. Matzander MFS-06. *Product Manual*, Metronix Measurement and Electronics Ltd, 2001, 27 p. 12. Ничога В.А., Дуб П.Б., Захаркин А.К. Локальные активные низкопороговые индукционные датчики (ЛАНИД) и их использование в электроразведочных работах по методу ЗСБ и ЗСМП // *Геофизическая аппаратура*. – № 102. – СПб., 1999. – С.28–34. 13. Беркман Р.Я., Корепанов В.С., Марусенков А.А., Пристай А.М., Сухинюк А.С. Прилади для вимірювання слабих магнітних полів // *IV Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» «Метрологія–2004»: Наукові праці конференції*. – Харків, 2004. – С.298–300. 14. Berkman J. Low Weight Wide Band Search-coil Magnetometers // *Proceedings of the V-th Symposium of Magnetic Measurements*, Kielce, Poland, 1997. – P.45–52. 15. <http://www.ifp.fzk.de/ISAS/Hotline>. 16. Дуб П.Б., Ничога В.А. Новые принципы, тенденции развития датчиков для измерения слабых НЧ и ИНЧ магнитных полей // *Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-93) (Гурзуф, 23–31 мая 1993)*. – М.: Изд. МИСМ. – 1993. – Ч.П. – С.174–175. 17. Како Н., Яманэ Я. Датчики и микро-ЭВМ / Пер. с яп. – Л.: Энергоатомиздат. – 1986. – 120 с. 18. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение / Пер. с нем. – М.: Мир. – 1989. – 196 с. 19. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с. 20. Нічога В.О. Тенденції розвитку та побудови давачів магнітних і механічних величин сучасних інформаційно-вимірювальних систем // *Відбір і обробка інформації*. – 2001. – Вып. 15(91). – С.112–122. 21. Мизюк Л.Я., Ничога В.А. Электрические параметры индукционных низкочастотных магнитоприемников с ферромагнитными сердечниками // *Геофизическое приборостроение*. – Л., 1964. – Вып.20. – С.37–61. 22. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968. – 247 с. 23. Ничога В.А. Шумовые параметры элементов входной цепи с индукционным магнитоприемником // *Геофизическая аппаратура*. – Л.: Недра. – 1977. – Вып. № 60. – С.94–104. 24. Nichoga V., Dub P. Measuring Sensors for Investigation of Magnetic Field on the Board of Space Apparatuses // *Proceedings of the Fourteenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, pp. 220–223, Wroclaw, Poland, June 23–25, 1998. 25. Nichoga V., Sokol-Kutylovskij O., Dub P., Sopilnyk L. Amorphous Ferromagnetic Alloys in Modern Inductive Sensors of Alternating Magnetic Fields // *Proceedings of the 3rd International Symposium on Microelectronics Technologies and Microsystems*, Kosice, June 3–5, Slovakia, 1999. – P.95–102. 26. <http://www.zongec.com> 27. <http://www.emiinc.com> 28. Информационный листок предприятия “Эжонтех” Российской Академии Наук. Геологоразведка. – СПб., 2006. – С.1. 29. Berkman R., Korepanov V., Marussenkov A., Sukhnyuk A. Super-light magnetometers for nanosatellites // *Abstracts of EGS XXVII General Assembly, Nice, France, April 2002*. 30. Nichoga V., Grudzinski E., Dub P., Pronenko V. Superwide Band Low-Noise Induction Sensors in Magnetic Field Measurements // *Proceedings of the 9th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2008)*, 19–23 February 2008, Lviv–Slavsko, Ukraine. – P. 18–21.