

## НОВИЙ МЕТОД ВИДІЛЕННЯ СИГНАЛУ ФЕРОЗОНДА

А. А. Марусенков

Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України

E-mail: marand@isr.lviv.ua

За допомогою спеціалізованого швидкодіючого вимірювального пристрою досліджений розподіл інтенсивності стрибків Баркгаузена протягом циклу перемагнетчування ферозондових перетворювачів з малим рівнем власних шумів. Запропонований новий підхід до детектування сигналу цих сенсорів, який враховує статистичні характеристики шумів перемагнетчування. Це дало можливість суттєво зменшити власний рівень шумів ферозонда порівняно з традиційним методом виділення сигналу на другій гармоніці частоти збудження.

**Ключові слова:** *ферозондовий магнетометр, ферозондовий давач, детектування сигналу, шуми перемагнетчування, феромагнетний матеріал.*

## A NEW METHOD OF FLUXGATE SIGNAL EXTRACTION

A. A. Marusenkov

Lviv Centre of the Institute for Space Research of NAS and SSA of Ukraine

Using dedicated high-frequency measuring system the distribution of the Barkhausen jumps intensity along a reversal magnetization cycle was investigated for low noise fluxgate sensors of various core shapes. It is shown that Barkhausen (reversal magnetization) noise intensity is strongly inhomogeneous during an excitation cycle. In the traditional second harmonic fluxgate magnetometers the signals are extracted in the frequency domain, as a result, some average value of reversal magnetization noises is contributed to the output signals. In order to fit better the noise shape and minimize its transfer to the magnetometer output the new approach for demodulating signals of these sensors is proposed. The new demodulating method is based on information extraction in the time domain taking into account the statistical properties of cyclic reversal magnetization noises. This approach yields considerable reduction of the fluxgate magnetometer noise in comparison with demodulation of the signal filtered at the second harmonic of the excitation frequency.

**Keywords:** *flux-gate magnetometer, flux-gate sensor, signal demodulation, noise of reverse magnetization, ferromagnetic material.*

Векторні магнетометри, побудовані з використанням ферозондових давачів (ФЗД), широко використовують для різного виду геофізичних досліджень. Вимоги до їх параметрів постійно зростають, що призводить до необхідності теоретичних та експериментальних робіт, спрямованих передусім на пошук шляхів зниження порога чутливості. Починаючи від першої публікації, яка стосувалася ферозондових магнетометрів (ФЗМ) [1], різним аспектам особливостей їх роботи присвячена величезна кількість праць. Цікаво відзначити, що принцип роботи та основні структури ФЗМ залишаються без змін більш як 80 років після їх винаходу, а кількість публікацій при цьому не зменшується. Зростання їх кількості в останні десятиліття, ймовірно, викликане тим, що, хоча деякі сучасні магнетометри, які побудовані за іншими фізичними принципами, і можуть перевершувати ФЗМ за таким найважливішим параметром як рівень шуму, сукупність параметрів ФЗМ, як і раніше, залишає їх найзручнішими для використання, особливо в геофізиці.

Детальний аналіз сучасного стану ФЗМ поданий у праці [2]. Там також описані способи досягнення мінімального рівня шумів ФЗМ, побудованих за традиційною схемою з використанням корисного сигналу, який виділяють на парних гармоніках (переважно на другій) частоти збудження. Цей спосіб обробки сигнала

© А. А. Марусенков, 2017

лу має свої обмеження і результат цілком залежить від якості магнетного матеріалу осердя давача ФЗМ – його рівня шумів перемагнечування. Цей шумовий сигнал викликаний неповторюваністю переходів між станами насичення від циклу до циклу, який часто ототожнюється з флуктуаціями параметрів стрибків Баркгаузена [3]. Важливо відзначити, що інтенсивність цих флуктуацій за циклічного перемагнечування періодично залежить від часу – шум не є стаціонарним [4]. Інтенсивність стрибків Баркгаузена змінюється залежно від ділянки петлі гістерезису та циклів збудження на ній [5–7]. Враховуючи фізичну природу намагнеченості, можна очікувати, що повторюваність станів під час перемагнечування вища на ділянках насичення осердя.

На відміну від традиційного напряму досліджень, який полягає в удосконаленні параметрів матеріалу осердя давача та способів виділення парних гармонік, нижче дослідили характер флуктуацій намагнеченості осердь, виготовлених із матеріалів з малим рівнем шумів, під час їх циклічного перемагнечування та спробували оптимізувати демодуляцію вимірювального сигналу з урахуванням цих особливостей. Експериментальні результати отримали за допомогою спеціально створеної вимірювальної установки.

**Експериментальна установка та методика досліджень.** Структурна схема вимірювальної установки подана на рис. 1. Установка базується на швидкісному 16-розрядному аналогово-цифровому перетворювачі (АЦП) LTC2207 [8]. АЦП встановлений на відлагоджувальному модулі DC919A [9], підключеному до спеціалізованого USB-контролера DC718B [10]. На модулі DC919A встановлений стабільний кварцовий генератор частоти 19,44 МГц, який визначає період дискретизації АЦП. Крім того, сигнал з цього генератора надходить на подільник частоти, на виході якого формується набір сигналів з частотами від 1,18 кГц до 2,43 МГц. Один з цих сигналів надходить на схему збудження ферозондового давача. Таким чином, досягається синхронність відліків АЦП протягом циклу перемагнечування, що потрібно для порівняння перемагнечування в різних циклах. Для вимірювання сигналу, пропорційного до магнетного потоку в осерді, напруга вимірювальної обмотки подається на підсилювач-узгоджувач через опційну інтегровальну ланку. Для зменшення впливу перехідних коливальних процесів, які можуть виникати внаслідок паразитних ємностей вимірювальної обмотки, вхідного кабелю та підсилювача, використовували маловиткові вимірювальні обмотки ФЗД. Персональний комп'ютер (ПК) взаємодіє з контролером DC718B за допомогою програмного забезпечення PScope/QuickEval-II [11]. За командою ПК контролер DC718B здатний зібрати до 131072 відліків АЦП та зберегти їх у внутрішній пам'яті. Після цього збережені дані передають на ПК, де їх аналізують та обробляють. Для кожного ФЗД протягом 6,74 мс (131072 відліки) почергово записували такі сигнали:

- напруга збудження;
- струм збудження;
- напруга на вимірювальній обмотці за збудженого осердя;
- напруга на вимірювальній обмотці за незбудженого осердя;
- напруга на вимірювальній обмотці при збудженому осерді за впливу на нього відомого постійного магнетного поля (калібрування).

Записували по п'ять-шість реалізацій кожного зі сигналів з інтервалом 10–20 секунд, необхідним для вичитування даних і збереження їх у комп'ютері. Подальшу обробку здійснювали за допомогою програм, написаних у середовищі MATLAB.

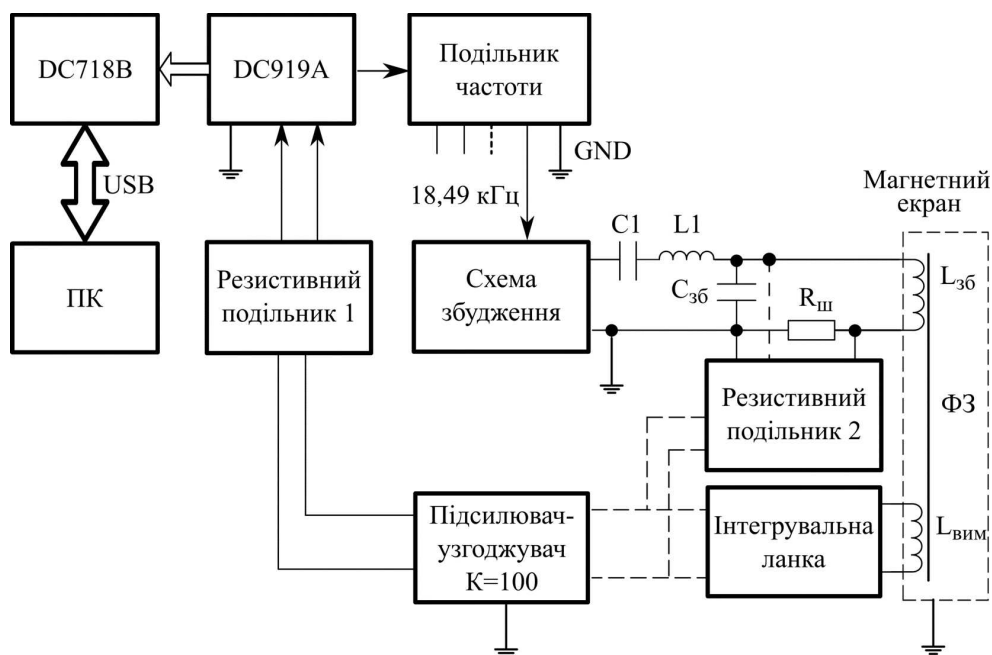


Рис. 1. Структурна схема виміральної установки.

**Обробка результатів вимірювань.** Як і в попередніх дослідженнях [3, 12], виявили, що спектр сигналу на виході виміральної обмотки ФЗД має дискретно-суцільний характер.

Оскільки нас цікавить шумова або суцільна складова, перед її детальним дослідженням необхідно виокремити й усунути дискретні компоненти спектра. До них належать [3, 13]:

- сигнал небалансу – частина вихідного сигналу ФЗД, яка містить лише непарні гармоніки частоти збудження;
- корисний сигнал – частина вихідного сигналу ФЗД, пропорційна до вимірюваного параметра (містить парні гармоніки частоти збудження);
- хибний сигнал – решта сигналу на парних гармоніках частоти збудження після віднімання корисного сигналу.

Сигнал небалансу розраховували так. Спочатку записану реалізацію переформатували з вектора  $\mathbf{S}$  в матрицю  $\mathbf{A}$ , кожний стовпчик якої відповідає сигналу на певному півперіоді збудження:

$$\mathbf{A}(:,j) = s((j-1) \cdot M/2 + (1:M/2)), \quad j = 1, 2, \dots, 2N,$$

де  $M$  – кількість відліків протягом періоду збудження;  $N$  – кількість періодів збудження протягом записаної реалізації; символ “:” позначає діапазон значень.

Елементи матриці  $\mathbf{A}$  підсумували за формулою

$$p_i = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^{2N} (-1)^{j-1} a_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, M/2,$$

отримуючи елементи вектора-стовпчика  $\mathbf{P}$  – усередненого сигналу небалансу на непарних півперіодах збудження. На парних півперіодах збудження сигнал такий же за формою, але протилежний за знаком.

Наступний етап – виокремлення сигналу, який містить лише парні гармоніки частоти збудження. Елементи відповідного вектора-стовпчика  $\mathbf{Q}$  розраховані за виразом

$$q_i = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^{2N} a_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, M/2. \quad (1)$$

Для виокремлення корисного та хибного сигналів зі сумарного сигналу  $\mathbf{Q}$  використали калібрування давача. Для цього записували напругу вимірювальної обмотки за двох протилежних напрямів калібрувального сигналу – постійного магнетного поля з таким же відомим значенням. За виразом (1) для кожної з записаних реалізацій знаходили вектори усередненого сигналу на парних гармоніках  $\mathbf{Q1}$  та  $\mathbf{Q2}$  і вираховували нормований відгук давача на сигнал калібрування:

$$\mathbf{Q0} = \frac{0,5 \cdot \mathbf{Q1} - 0,5 \cdot \mathbf{Q2}}{B_{\text{кал}}}, \quad (2)$$

де  $B_{\text{кал}}$  – значення калібрувального сигналу.

Оскільки за заданих параметрів збудження форма корисного сигналу у довільній реалізації відповідатиме знайденому сигналу  $\mathbf{Q0}$ , необхідно оцінити лише його інтенсивність, розрахувавши коефіцієнт масштабу  $k$ . Використовуючи метод найменших квадратів, коефіцієнт масштабу знаходили за формулою

$$k = \left( \mathbf{Q0}^T \cdot \mathbf{Q0} \right)^{-1} \cdot \mathbf{Q0}^T \cdot \mathbf{Q},$$

де “ $T$ ” – транспонування.

Таким чином, корисний сигнал дорівнює:

$$\mathbf{Q}_{\text{кор}} = k \mathbf{Q0},$$

а хибний сигнал знаходимо за формулою

$$\mathbf{Q}_{\text{хибн}} = \mathbf{Q} - k \mathbf{Q0}.$$

Приклади розподілу детермінованих сигналів на вимірювальній обмотці ФЗД з овальним осердям із полікристалічного магнетного матеріалу 83НФ упродовж періоду збудження наведені на рис. 2а–в. Усунувши детерміновані сигнали зі запису, отримуємо шумовий залишок:

$$\mathbf{B}(:,j) = \mathbf{A}(:,j) + (-1)^j \mathbf{P} - \mathbf{Q}, \quad j = 1, 2, \dots, 2N. \quad (3)$$

Мірою неповторюваності шумового сигналу на різних циклах перемагнетчування є стандартне відхилення, розраховане за формулою

$$d_i = \left( \frac{1}{2N-1} \sum_{j=1}^{2N} (b_{i,j} - \bar{b}_i)^2 \right)^{1/2}, \quad \bar{b}_i = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^{2N} b_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, M/2.$$

Розподіл стандартного відхилення шумового сигналу протягом періоду збудження цього давача наведений на рис. 2г. Видно, що інтенсивність шуму поступово наростає до максимального значення за наближення до стану насичення осердя. Безпосередньо перед насиченням осердя інтенсивність шуму різко зменшується до мінімального значення, яке тут визначається порогом чутливості вимірювальної установки. Мінімум шуму спостерігаємо в станах насичення осердя та на ділянках виходу з нього. Отже, інтенсивність шуму неоднорідна протягом півциклу перемагнетчування. Порівнявши розподіл шуму (рис. 2г) з формою корисного сигналу (рис. 2б), стає зрозуміло, що з точки зору мінімізації шумів вигідно детектувати сигнал на ділянках виходу осердя зі стану насичення. З цієї

причини слід зазначити, що в традиційних ФЗМ не існує технічної можливості застосувати селективне детектування сигналу на вибраній ділянці періоду збудження.

Подібний характер розподілу інтенсивності шумів протягом періоду збудження спостерігали і на ФЗД з кільцевими, овальними та стрижневими осердями, виготовленими як з полікристалічних, так і аморфних магнетних матеріалів.

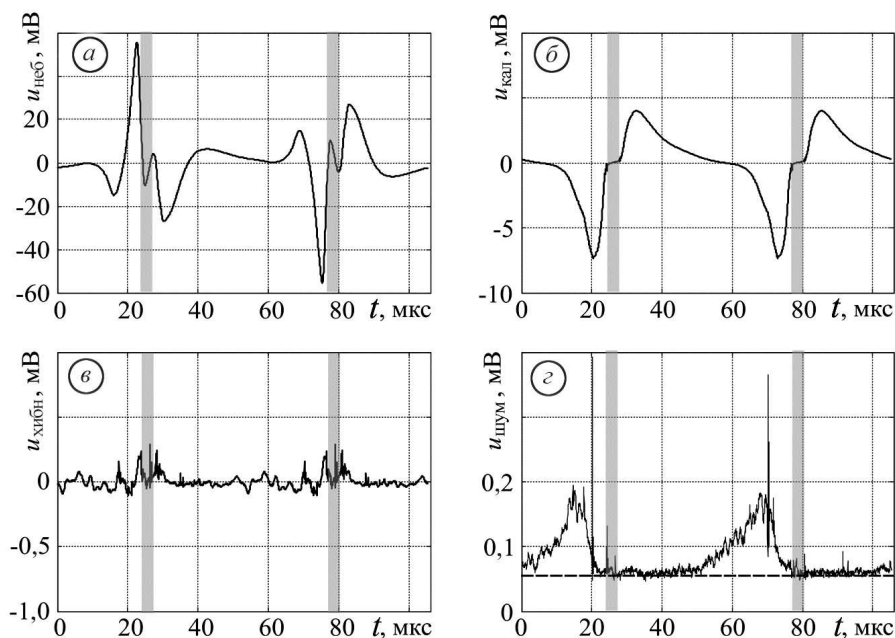


Рис. 2. Розподіл сигналів протягом періоду збудження: *a* – сигнал небалансу; *б* – нормований відгук на калібрувальне поле  $B_{\text{кал}} = 1$  мкТл; *в* – хибний сигнал; *з* – стандартне відхилення шумового сигналу. Сірими вертикальними смугами позначені часові інтервали, коли осердя в стані насичення. Власні шуми вимірювального пристрою позначені штриховою горизонтальною лінією на графіку *з*.

Результати досліджень двострижневого давача довжиною 60 мм з аморфним осердям, яке збуджували на частоті 38 кГц, подані на рис. 3. Сигнал з вимірювальної обмотки давача подавали на попередній підсилювач через інтегровальну ланку з часом інтегрування  $\tau = 100$  мс. На рис. 3 показані: корисний сигнал  $U_{\text{кал}}$  (крива 1), середньоквадратичне відхилення напруги шуму на вимірювальній обмотці за циклічного перемагнетчування осердя  $U_{\text{ш зб}}$  (крива 2), середньоквадратичне відхилення напруги шуму на вимірювальній обмотці за відсутності збудження  $U_{\text{ш незб}}$  (крива 3), яке є сумою теплових шумів обмотки та осердя й шуму вимірювальної установки. Як видно з рис. 3, форма корисного

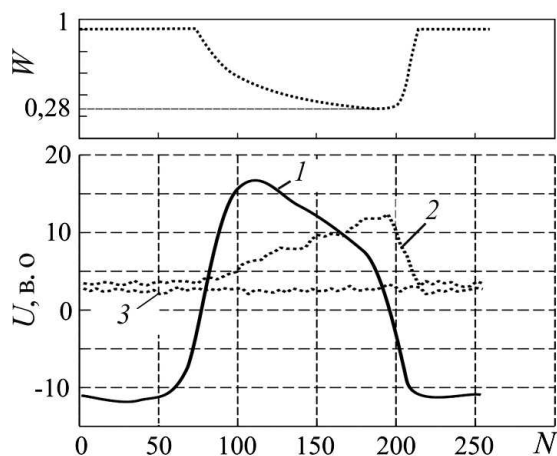


Рис. 3. Усереднені сигнали на вимірювальній обмотці ФЗД:  $W$  – вагова функція,  $U$  – напруга,  $N$  – відліки. 1 –  $U_{\text{кал}}$ ; 2 –  $U_{\text{ш зб}}$ ; 3 –  $U_{\text{ш незб}}$ .

сигналу  $U_{\text{кал}}$  і розподіл інтенсивності шумів перемагнечування  $U_{\text{ш 3б}}$  суттєво відрізняються.

З цього робимо важливий висновок. Припустимо, що шум у магнетному осерді містить низькочастотну складову. Вона додавалась би до вимірюваного поля і відокремити їх було б неможливо. Тобто можна було б очікувати, що розподіл інтенсивності низькочастотної складової шуму осердя на періоді збудження відповідав би формі корисного сигналу. Оскільки цього не спостерігаємо, можна стверджувати, що низькочастотна складова шуму в осерді є суттєво меншою від складових шуму поблизу парних гармонік частоти збудження.

**Вибір методу детектування корисного сигналу.** Внаслідок того, що шуми перемагнечування додаються до вимірюваного сигналу після його модуляції і локалізовані поблизу гармонік частоти збудження, з'являється можливість оптимізувати демодуляцію за критерієм мінімального шуму.

Для цього покажемо формування вихідного сигналу однофакторною лінійною регресійною моделлю [12]:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot s + \boldsymbol{\varepsilon},$$

де  $s$  – параметр, який необхідно оцінити;  $\mathbf{X}$  – вектор-стовпчик зі значеннями наперед відомого опорного сигналу;  $\mathbf{Y}$  – вектор-стовпчик зі значеннями напруги вихідного сигналу давача;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – вектор-стовпчик залишків регресії.

У нашому випадку кількість рядків у вектор-стовпчиках  $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{X}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  дорівнює кількості відліків протягом половини періоду частоти збудження. Розбивши весь запис на  $2N$  інтервалів тривалістю по півперіоду частоти збудження, знайдемо оцінку параметра  $s$  на кожному з цих інтервалів. При цьому використаємо вихідний сигнал давача після усунення детермінованих сигналів, розрахованих за виразом (3). Тобто  $\mathbf{Y} = \mathbf{B}(:,j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, 2N$ .

Як опорний сигнал використаємо нормований відгук давача на сигнал калібрування, розрахований за виразом (2):  $\mathbf{X} = \mathbf{Q}0$ . Оскільки залишки регресії  $\boldsymbol{\varepsilon}$  переважно визначаються шумами перемагнечування, їхня дисперсія протягом півперіоду частоти збудження не є сталою. За таких умов, оцінку параметра  $s$  шукатимемо за допомогою методу зважених найменших квадратів [12]:

$$s = \left( \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{X} \right)^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{Y}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{V}$  – коваріаційна матриця залишків регресії.

Суть методу полягає в лінійному перетворенні початкових даних і застосуванні звичайного методу найменших квадратів. Мета цього перетворення – привести статистичні характеристики залишків регресії до таких, що задовольняють класичні припущення. Приймемо, що в нашому випадку коваріаційна матриця містить лише діагональні елементи, тобто дані перетворюються зважуванням (діленням на значення, пропорційне до передбаченого стандартного відхилення випадкових змінних  $\boldsymbol{\varepsilon}$ ) як спостережень (вектор-стовпчик  $\mathbf{Y}$ ), так і опорного сигналу (вектор-стовпчик  $\mathbf{X}$ ). Вигляд вагової функції показано на верхній діаграмі рис. 3.

За наведеною вище процедурою обробили дані згаданого двострижневого давача з аморфним осердям довжиною 60 мм. Розрахований за виразом (4) набір з  $2N$  оцінками параметра  $s$  ( $N = 512$ ) використаний для аналізу спектральної густини шумів (рис. 4, крива 1).

Для порівняння ефективності запропонованої процедури демодуляції сигналу такий же набір початкових даних був опрацьований за алгоритмом роботи магнетометра з виходом на другій гармоніці частоти збудження (рис. 4, крива 2). Як видно з рис. 4, новий підхід забезпечує майже дворазове зменшення рівня

шумів порівняно з традиційним методом демодуляції сигналу. Слід зазначити, що значна частина шумового сигналу зумовлена шумами вимірювальної установки (криві 2 і 3 на рис. 3). Отже, можна очікувати, що з подальшим вдосконаленням останньої, переваги запропонованого методу детектування сигналу будуть ще суттєвішими.

### ВИСНОВКИ

Розглянуто сучасний стан проблеми шумів ферозондових магнетометрів. Зроблено припущення, що, оскільки подальше зниження рівня шумів ФЗМ гальмується, в основному, недосконалістю магнетних матеріалів, використовуваних для осердя ферозондів, можливості виділення корисного сигналу за допомогою частотної селекції практично вичерпані.

За допомогою швидкісної вимірювальної установки детально досліджений розподіл інтенсивності шумів Баркгаузена протягом циклу перемагнечування ферозондових перетворювачів. Відпрацьована методика вимірювань та попередньої обробки даних, яку використали на декількох зразках магнетомодуляційних перетворювачів. Як наслідок, підтверджено неоднорідність шумів Баркгаузена протягом циклу перемагнечування та розроблено процедуру демодуляції корисного сигналу ферозонда, що зменшує внесок у вихідний сигнал ділянок циклу з підвищеним рівнем шумів перемагнечування, знижуючи тим рівень шуму на виході ФЗМ. Порівняння рівня шуму з використанням традиційного детектування на другій гармоніці частоти збудження та нової процедури показало суттєві переваги останньої.

1. *Aschenbrenner H., Goubau G.* Eine Anordnung zur Registrierung rascher magnetischer Stoerungen // Hochfrequenztechnik und Elektroakustik. – 1936. – XLV11(6). – P. 177–181.
2. *Korepanov V., Marusenkov A.* Flux-Gate Magnetometers Design Peculiarities // Surveys of Geophysics. – 2012. – 33. – P. 1059–1079. DOI 10.1007/s10712-012-9197-8.
3. *Афанасьев Ю. В.* Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 188 с.
4. *Bittel H.* Noise of ferromagnetic materials // Trans. Magn. – 1969. – 3. – P. 359–364.
5. *Bertotti G., Fiorillo F., Sassi M. P.* Barkhausen noise and domain structure dynamics in Si-Fe at different points of the magnetization curve // J. Magn. Magn. Mater. – 1981. – 23. – P. 136–148.
6. *Magnetostriction, Barkhausen noise and magnetization processes in E110 grade non-oriented electrical steels* / F. Bohn, A. Gündel, F. J. G. Landgraf, A. M. Severino, R. L. Sommer // J. Magn. Magn. Mater. – 2007. – 317. – P. 20–28.
7. *Mykolaitis H.* Cyclic magnetization noise of nonlinear ferromagnetic cores // J. Magn. Magn. Mater. – 1994. – 133. – P. 520–524.
8. *Linear Technology Corporation, LTC2207/LTC2206 16-Bit, 105Msps/80Msps ADCs, Rev. C.* – 2016. – <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/22076fc.pdf>.
9. *Linear Technology Corporation, Quick start guide for demonstration circuit 919 16-bit 10 to 105 MSPS ADC.* – 2004. – <http://cds.linear.com/docs/en/demo-board-manual/dc919af.pdf>.
10. *Linear Technology Corporation, Quick start guide for demonstration circuit 718 Quickeval-II.* – 2016. – <http://cds.linear.com/docs/en/demo-board-manual/dc718B.pdf>.
11. *Linear Technology Corporation, PScope Basics.* – 2013. – <http://www.linear.com/solutions/4454>.
12. *Грановский В. А., Сирая Т. Н.* Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
13. *Беркман Р. Я., Тымчук Х. К.* Ложные сигналы и погрешности феррозондовых измерительных устройств // Геофизическая аппаратура. – 1971. – Вып. 47. – С. 45–53.

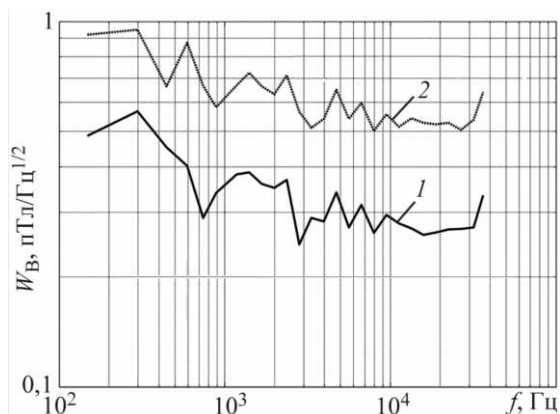


Рис. 4. Рівень власних шумів двострижневого ферозондового давача за різних демодуляцій корисного сигналу: 1 – метод зважених найменших квадратів; 2 – детектування на другій гармоніці.

Одержано 12.01.2017