

PACS numbers: 07.55.Ge, 75.50.Cc, 75.60.Jk, 75.70.Kw, 75.78.Fg, 75.85.+t, 85.80.Jm

## **Малогабаритные датчики магнитного поля на основе тонкой фольги из аморфных кобальтовых сплавов ММ-3Со, ММ-5Со и мартенситных кристаллов NiMnGa**

Н. Н. Крупа, Ю. Б. Скирта, И. В. Шарай

*Институт магнетизма НАН и МОН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36<sup>а</sup>,  
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

Задача создания малогабаритных высокочувствительных датчиков магнитного поля, работающих в широком диапазоне частот и амплитуд измеряемых полей, а также имеющих узкую диаграмму направленности и малый коэффициент температурного дрейфа, является актуальной и требует поиска новых магнитных материалов и разработки новых принципов построения таких датчиков. В данной работе представлены результаты по разработке малогабаритных высокочувствительных феррозондовых датчиков с магнитным сердечником из аморфной ленты кобальтового сплава ММ-3Со и ММ-5Со, а также магнитоэлектрических датчиков на основе мартенситных монокристаллов NiMnGa. Феррозондовые датчики на основе аморфной ленты имеют высокую чувствительность  $k > 0,1$  В/Э при низком уровне собственных шумов  $\gamma < 10^{-9}$  нТ/Гц и могут использоваться для измерения направления и величины магнитного поля в широкой спектральной области переменного магнитного поля от 0 до  $10^6$  Гц. Магнитоэлектрические датчики при чувствительности  $k > 0,01$  В/Э позволяют проводить измерения магнитного поля средней и большой величины одновременно по двум координатам в достаточно широком диапазоне частот.

Задача створення малогабаритних високочутливих давачів магнетного поля, які працюють у широкому діапазоні частот і амплітуд вимірюваних полів, мають вузьку діаграму спрямованості й малий коефіцієнт температурного дрейфу, є актуальною та вимагає пошуку нових магнетних матеріалів і розробки нових принципів побудови таких давачів. У даній роботі представлено результати з розробки малогабаритних високочутливих феррозондових давачів з магнетним осердям із аморфної фольги кобальтового сплаву ММ-3Со і ММ-5Со, а також магнитоелектричних давачів на основі мартенситних монокристалів NiMnGa. Феррозондові давачі мають високу чутливість  $k > 0,1$  В/Е за низького рівня власних

шумів  $\gamma < 10^{-9}$  нТ/Гц і можуть використовуватися для мірювання напрямку та величини магнетного поля в широкій спектральній області змінного магнетного поля від 0 до  $10^6$  Гц. Магнетоелектричні датчики за чутливості  $k > 0,01$  В/Е уможливають проводити мірювання середніх і сильних магнетних полів одночасно за двома координатами в досить широкому діапазоні частот.

The problem of poiesis of compact highly-sensitive magnetic-field sensors operating in a wide range of frequencies and amplitudes of the measured fields as well as having both a narrow radiation pattern and a low-temperature drift is actual and requires search for new magnetic materials and development of new principles of such sensors. The results on the development of compact highly-sensitive fluxgate sensors with magnetic core of amorphous foil of the MM-3Co and MM-5Co cobalt alloys and magnetoelectric sensors based on the martensitic single crystal NiMnGa are presented in this paper. The fluxgate sensors have high sensitivity,  $k > 0.1$  V/Oe, with a low threshold of sensitivity,  $\gamma < 10^{-9}$  nT/Hz, and can be used to measure both the direction and the magnitude of magnetic field in a wide range of the alternating magnetic-field spectrum from 0 to  $10^6$  Hz. The magnetoelectric sensors with sensitivity  $k > 0.01$  V/Oe allow us to measure the magnetic field of medium and high values simultaneously on two coordinates in a quite wide range of frequencies.

**Ключевые слова:** датчик магнитного поля, аморфная фольга, феррозонд, мартенситный кристалл.

*(Получено 23 июня 2014 г.)*

## ВВЕДЕНИЕ

Датчики магнитного поля все шире используются не только в системах измерения считывания электромагнитных сигналов, но в системах управления сложными механизмами и процессами, в различных приборах ориентации и т.д. Поэтому задача создания малогабаритных высокочувствительных датчиков магнитного поля, работающих в широком диапазоне частот и амплитуд измеряемых полей, а также имеющих узкую диаграмму направленности и малый коэффициент температурного дрейфа, остаётся актуальной и требует поиска новых магнитных материалов и разработки новых принципов построения таких датчиков. Последние достижения в области физики магнитных материалов позволяют не только улучшить технические характеристики и уменьшить габариты хорошо известных датчиков магнитного поля, но и создавать принципиально новые типы датчиков.

В настоящее время наиболее широко используются такие основные типы датчиков: датчики на эффекте Холла, феррорезонансные, магниторезистивные и магнитооптические датчики,

спин-вентильные и квантовые или протонные датчики, а также сквидовские магнитометры. Основным недостатком спин-вентильных датчиков является невысокая чувствительность и слабая зависимость величины измеряемого сигнала от направления магнитного поля. Поэтому такие датчики используются, в основном, для измерения неслабого магнитного поля, а также в системах регистрации информации для управления подвижными механизмами. Системы со сквидовскими датчиками являются высокочувствительными, однако они технически сложные и нуждаются в низкотемпературной системе охлаждения. Квантовые или, как их ещё называют, протонные датчики работают на эффекте зависимости характеристик прецессии магнитного момента протона от величины измеряемого магнитного поля. Эти датчики при высокой чувствительности практически не позволяют определять направление и частоту измеряемого переменного магнитного поля, а также требуют достаточно сложной системы электронного управления и измерения. Датчики Холла являются малогабаритными и широко используются для измерения средних по величине напряжённостей магнитного поля. Эти датчики имеют слабую нелинейную характеристику и высокий коэффициент температурного дрейфа.

Магниторезистивные датчики магнитного поля целесообразно использовать для измерения направления магнитного поля в области средних магнитных полей в широком диапазоне частот от 0 до 1 МГц. При более высоких частотах проводимость магниторезистивных элементов может падать за счёт скин-эффекта. Магниторезистивные датчики целесообразно использовать для направления поля в области слабых и средних магнитных полей. В этих датчиках с ростом индукции магнитного поля возрастает и входное сопротивление магниточувствительного элемента, что приводит к увеличению уровня шумов.

Феррозондовые датчики магнитного поля используются для измерения постоянных и низкочастотных переменных магнитных полей и их градиентов. В простом варианте датчик состоит из ферромагнитного сердечника из материалов с высокой магнитной проницаемостью и двух катушек: катушки возбуждения, на которую подаётся переменный ток, и измерительной катушки. Эти датчики отличаются высокой чувствительностью к переменному магнитному полю (величина магнитного шума для них в полосе частот до 0,1 Гц находится на уровне 10 мкА/м). Однако для достижения высокой чувствительности приходится увеличивать индуктивность регистрирующих катушек и габариты датчика, что снижает полосу рабочих частот (обычно на уровне нескольких десятков килогерц).

В данной работе мы хотим изложить результаты разработки

малогабаритных высокочувствительных широкополосных феррозондовых датчиков с магнитным сердечником из 20 мкм аморфной ленты кобальтового сплава ММ-3Со и ММ-5Со производства ЛТД МЕЛТА, которые имеют высокую чувствительность  $k > 0,1$  В/Э при низком уровне собственных шумов  $\gamma < 10^{-5}$  Э и могут использоваться для измерения направления и величины магнитного поля в широкой спектральной области переменного магнитного поля от 0 до  $10^6$  Гц. Кроме того, в работе описан принцип работы и схема построения двухкоординатных широкополосных датчиков магнитного поля принципиально нового типа на основе магнитных мартенситных монокристаллов NiMnGa и приведены результаты измерения магнитного поля с помощью цифрового магнитометра, созданного нами на базе персонального компьютера и экспериментальных образцов наших датчиков.

## 1. ФЕРРОЗОНДОВЫЕ ДАТЧИКИ С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ АМОРФНОЙ ФОЛЬГИ КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВА ММ-5Со

### 1.1. Схема и принцип работы феррозондовых датчиков

Особенностью разработанных нами [1] феррозондовых датчиков магнитного поля являлось то, что в качестве магнитного сердечника в них использовалась тонкая 20–30 мкм аморфная лента кобальтового сплава ММ-3Со или ММ-5Со. Технология получения аморфных лент таких сплавов была разработана в Институте металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, и её мелкосерийное производство налажено в ЛТД МЕЛТА.

Аморфные сплавы ММ-3Со и ММ-5Со на основе кобальта имеют низкие значения магнитострикции и коэрцитивной силы, а также высокие значения магнитной проницаемости (табл. 1).

Малая толщина, очень малое значение коэффициента магнитострикции при высокой магнитной проницаемости и малой величине индукции насыщения в широкой области частот (рис. 1), а также чрезвычайно низкие потери при перемагничивании таких аморфных кобальтовых лент позволяют создавать на их базе высокочувствительные малогабаритные широкополосные феррорезонансные датчики магнитного поля.

На основе описанных аморфных фольг ММ-3Со и ММ-5Со нами разрабатывались два типа феррозондовых датчиков магнитного поля: датчик с магнитным сердечником в виде полоски толщиной 20–22 мкм, длиной  $l = 20$  мм и шириной 1,8–2 мм с катушками возбуждения (5–10 витков) с прямым и косым типами намотки (рис. 2). Регистрирующая катушка с прямым типом намотки (50–100 витков) наносилась непосредственно на сердечник из фольги.

**ТАБЛИЦА 1.** Основные физические характеристики аморфной фольги ММ-3Со и ММ-5Со

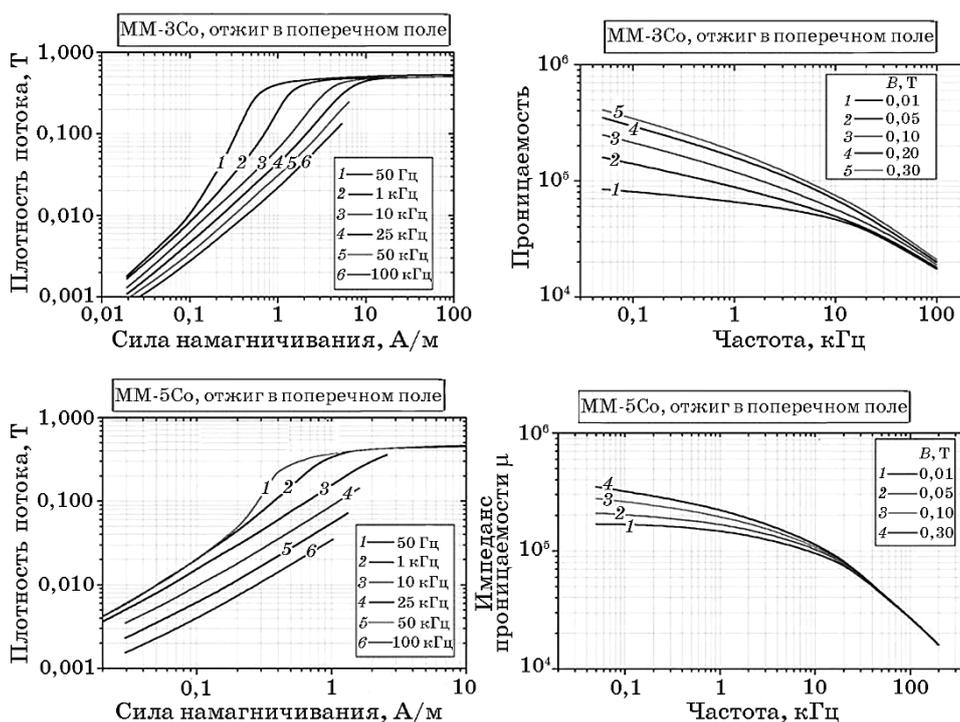
Сплав	ММ-3Со	ММ-5Со
Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	7,7	7,7
Максимальная толщина ленты, мкм	35	40
Электросопротивление $\rho$ , Ом·м <sup>2</sup> /м	1,30	1,35
Температурный коэффициент сопротивления (20–200°C), 10 <sup>-4</sup> /К	1,1	0,8
Индукция насыщения $B_s$ , Т	$\geq 0,52$	$\geq 0,46$
Температура Кюри $T_c$ , °С	180	$\geq 160$
Магнитострикция, $\times 10^6$	$< 0,5$	$< 0,2$
Статическая коэрцитивная сила $H_c$ , мА/см	$\leq 4$	$\leq 1,8$
Магнитная проницаемость на частоте $f = 1$ кГц, и поле $H = 0,2$ мА/см	40000–80000	90000–160000
Потери в области (0,2 Т/20 кГц), $P_{fe}$ (Вт/кг)	$\leq 6$	$\leq 3$
Потери в области (0,3 Т/100 кГц), $P_{fe}$ (Вт/кг)	$\leq 110$	$\leq 90$
Температура кристаллизации, °С	510	540
Диапазон рабочих температур, °С	[-60; 90]	[-60; 90]
Максимальная температура использования, °С	105	105

Особенностью наших феррозондовых датчиков с сердечниками из аморфной фольги является то, что функция  $\mu = f(H)$  имеет большую нелинейность, что с учётом зависимости  $\mu$  только от величины напряжённости поля и независимости от его направления можно записать как  $\mu = \mu_1 + \mu_2 H^2$ . В этом случае феррозондовые датчики можно использовать в двух режимах работы [2].

В первом режиме через катушку возбуждения датчики пропускают слабый переменный гармонический ток  $I_1(t) = I_1 \sin(\omega_1 t)$ , и сильный постоянный стабилизированный ток  $I_0$ . Магнитное поле переменного тока  $H_1(t) = H_1 \sin(\omega_1 t)$  будет меньше суммы измеряемого магнитного поля  $H_i(t)$  и магнитного поля постоянного тока  $H_1(t) = H_1 \sin(\omega_1 t) \ll H_i(t) + H_0$ . Величину электрического сигнала, снимаемого с регистрирующей катушки, в этом случае можно записать как

$$E = -2ksN_0\omega_0 H_1 H_2 \mu_1 \mu_{2\max} \cos \omega_0 t, \quad (1)$$

где  $\mu_{2\max}$  — максимальное значение коэффициента нелинейности магнитной проницаемости, задаваемое постоянным током  $I_0$ ;  $\mu_{2\max} = f(H_0)$ ;  $s$  — площадь поперечного сечения сердечника;  $N_0$  —



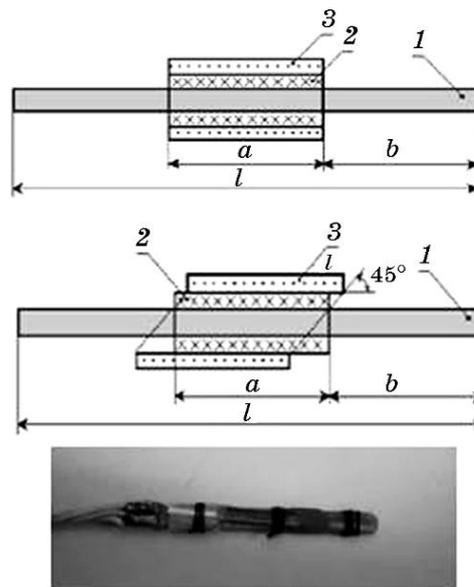
**Рис. 1.** Зависимости индукции насыщения от напряжённости поля перемангничивания и магнитной проницаемости от частоты для аморфной фольги ММ-3Со и ММ-5Со.

число витков в обмотке регистрирующей катушки;  $k$  — коэффициент пропорциональности. Феррозондовые датчики в этом режиме имеют нелинейную функцию преобразования [3], однако потребляют слабый ток.

Во втором режиме работы через катушку возбуждения датчики пропускают сильный переменный гармонический ток  $I_1(t) = I_1 \sin(\omega_1 t)$ , и слабый постоянный стабилизированный ток  $I_0$ . Магнитное поле переменного тока  $H_1(t) = H_1 \sin(\omega_1 t)$  будет намного больше измеряемого магнитного поля  $H_i(t)$  и магнитного поля постоянного тока  $H_1(t) = H_1 \sin(\omega_1 t) \gg H_i(t)$  и  $H_1(t) = H_1 \sin(\omega_1 t) \gg H_0$ . В этом режиме работы в измерительной обмотке нашего феррозондового датчика появляется сигнал удвоенной частоты возбуждения [3]. Величина этого сигнала пропорциональна величине напряжённости измеряемого магнитного поля  $H_2$ :

$$E = -2ksN_0\omega_0 H_1^2 H_2 \mu_1 \mu_{2\max} \cos \omega_0 t. \quad (2)$$

В общем случае, разложив в ряд Фурье по магнитному полю



**Рис. 2.** Схема построения и макетный образец феррозондовых датчиков с сердечников из аморфной фольги: 1 — сердечник, 2 — регистрирующая катушка, 3 — катушка возбуждения,  $l = 20$  мм,  $a = 5-8$  мм,  $b = 6-7$  мм.

зависимость магнитной проницаемости  $\mu = f(H)$ , мы можем получить для парных гармоник дифференциальной зависимости магнитной проницаемости

$$\mu_{2n} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \mu(\omega t) \cos 2n\omega_0 t d\omega t, \quad (3)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — целые числа.

Величина электрического сигнала снимаемого с феррозондового датчика для парных гармоник определяется как

$$E_i(\omega t) = 4k\mu_1 s\omega_0 N_0 H_0 \sum_{n=1}^n n\mu_{2n} \sin 2n\omega_0 t. \quad (4)$$

Для измерения характеристик феррозондовых датчиков нами был разработан цифровой магнитометр.

## 1.2. Функциональная схема магнитометра и методика измерений

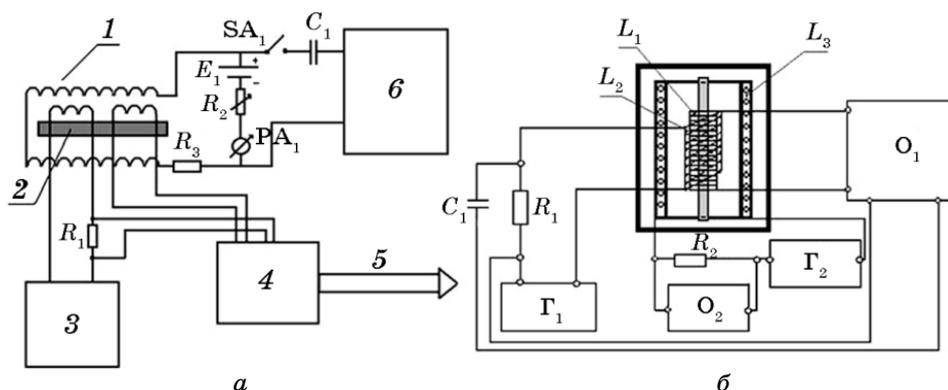
Основой нашего цифрового магнитометра является персональный компьютер и специально разработанное нами программное обес-

печение. В общем виде блок-схема такого магнитометра включает в себя персональный компьютер (ПК) как блок регистрации и обработки сигналов, блок генератора возбуждения, блок усиления и фильтрации низкочастотных сигналов, блок питания и магниточувствительный блок с одностержневыми перпендикулярно ориентированными феррозондовыми датчиками с обмотками возбуждения и регистрации.

В ПК по заданной программе формируются управляющие сигналы и подаются на генератор возбуждения. С генератора возбуждения подаётся стабилизированное переменное напряжение гармонической формы на катушки возбуждения феррорезонансного датчика. Измерительные сигналы, которые пропорциональны напряжённости измеренного низкочастотного магнитного поля, снимаются с регистрирующих катушек датчика, усиливаются усилителем, при необходимости фильтруются, преобразовываются аналогово-цифровым преобразователем в цифровую форму и регистрируются ПК. Введённый в систему фильтр позволяет измерять воздействие измеренного низкочастотного магнитного поля на основную гармонику возбуждения, или на гармонику удвоенной частоты возбуждения.

Использования ПК как генератора высокочастотных модуляционных сигналов возбуждения даёт возможность проводить спектральный анализ этих сигналов за счёт стандартного программного обеспечения с использованием звуковой платы компьютера, или с помощью специального программного обеспечения на основе анализа Фурье. Для расширения спектрального диапазона измерений и реализации режима одновременного измерения магнитного поля по трём координатам в данном макетном образце магнитометра, для генерации сигналов возбуждения, использовался высокочастотный генератор с тремя выходами (USB-генератор DDS 300 S). Сигналы с датчиков магнитного поля усиливались, преобразовывались в цифровой вид модулем ADA 1406 и записывались на ПК. Модуль ADA-1406 включает в себя многоканальный 14-ти разрядный аналогово-цифровой и двухканальный цифро-аналоговый преобразователи и предназначен для ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов. В магнитометре можно было устанавливать дополнительно широкополосные предварительные усилители. Магнитометр, собранный по описанной схеме, может работать с магниторезистивными, магнитоиндукционными, холловскими датчиками и т.д.

На рисунке 3, а представлена схема измерений характеристик датчиков магнитного поля на базе персонального компьютера, который управляет работой магнитометра. В качестве генератора измеряемого магнитного поля используются катушки Гельмгольца. Предварительно проводилась градуировка катушек Гельм-



**Рис. 3.** Схема измерений характеристик датчиков магнитного поля с катушками Гельмгольца (*а*) и с одной цилиндрической катушкой (*б*): 1 — катушки Гельмгольца, 2 — датчик, 3 — генератор DDS-3005 USB, 4 — ADA-1406, 5 — USB-интерфейс связи с ПК, 6 — генератор ГЗ-109 или Г6-37,  $E_1$  — гальванический источник опорного напряжения, платы регулировки и контроля ( $C_1$  — конденсатор развязки,  $R_1$  и  $R_3$  — опорные резисторы,  $R_2$  — регулятор постоянного тока,  $PA_1$  — микроамперметр,  $SA_1$  — переключатель,  $L_1$  — регистрирующая катушка феррозондового датчика,  $L_2$  — катушка возбуждения,  $L_3$  — цилиндрическая катушка,  $R_1$  и  $R_2$  — опорные резисторы,  $C_1$  — разделяющий конденсатор,  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  — генераторы сигналов ГЗ-109 и Г6-37;  $O_1$  и  $O_2$  — 2-канальные осциллографы TDS2012B и C1-93.

гольца постоянным током, и рассчитывался коэффициент пропорциональности между током и напряжённостью магнитного поля. Питание катушек обеспечивалось блоком питания постоянного тока НМ7042-5 и генераторами ГЗ-109 и Г6-37. Для повышения точности измерений в схеме использовался гальванический источник опорного напряжения и электронные платы регулировки и контроля.

При измерении частотных характеристик коэффициента магниточувствительности исследуемых датчиков в качестве источника измеряемого поля использовалась одна цилиндрическая катушка (рис. 3, б). Сигналы с датчиков магнитного поля регистрировались осциллографом TDS2012B и подавались на звуковую плату ПК, или усиливались и после модуля ADA 1406 подавались через интерфейс USB для записи ПК. При измерениях датчики магнитного поля вместе с катушками генератора магнитного поля могли помещаться в экранирующий алюминиевый бокс.

При измерении характеристик феррозондовых датчиков использовались две отдельных программы: программа сбора и записи данных и программа обработки. Для сбора данных была разработана программа «Soundwork», которая предназначена для

работы со звуковой картой компьютера, а также с высокоскоростной платой ЦАП и модулем ADA1406. Этот 8-канальный модуль преобразует сигнал из аналогового вида в цифровой с тактовой частотой 350 кГц. На звуковой плате использовалось 2 канала генератора с частотой до 20 кГц синусоидальной, пилообразной или прямоугольной форм с заданным сдвигом фазы, и 2 канала записи с тактовой частотой до 44 кГц. Данные записываются в виде бинарного файла, потом конвертируются в текстовый файл CSV-данных. Запись может осуществляться непрерывно до остановки оператором, или до заполнения буфера данными заданной длины. По первому каналу записывался сигнал из регистрирующей катушки, а по второму каналу — сигнал тока возбуждения катушек Гельмгольца. На катушку возбуждения и на катушки Гельмгольца подавались сигналы из разных каналов генератора DDS-3005 USB, который более стабильный и высокочастотный, чем звуковая карта.

Данные измерений обрабатывались с помощью пакета Matlab-2006, в котором нами было разработано несколько скриптов для спектрального анализа и построения графиков. Записанные сигналы измеренного магнитного поля раскладывались в ряд Фурье, причём при обработке Фурье-данных измеренного поля использовался модулированный сигнал второй гармоники от частоты возбуждения феррозондового датчика, а при обработке опорного сигнала с возбуждающей катушки и с катушек Гельмгольца использовался сигнал первой гармоники. Для улучшения раздельной способности использовалось окно Хемминга. Значение опорного сигнала использовалось для нормирования сигнала с феррозондового датчика и для компенсации некоторой нестабильности работы генератора исходного переменного тока. Для управления работой программы был разработан специальный интерфейс пользователя.

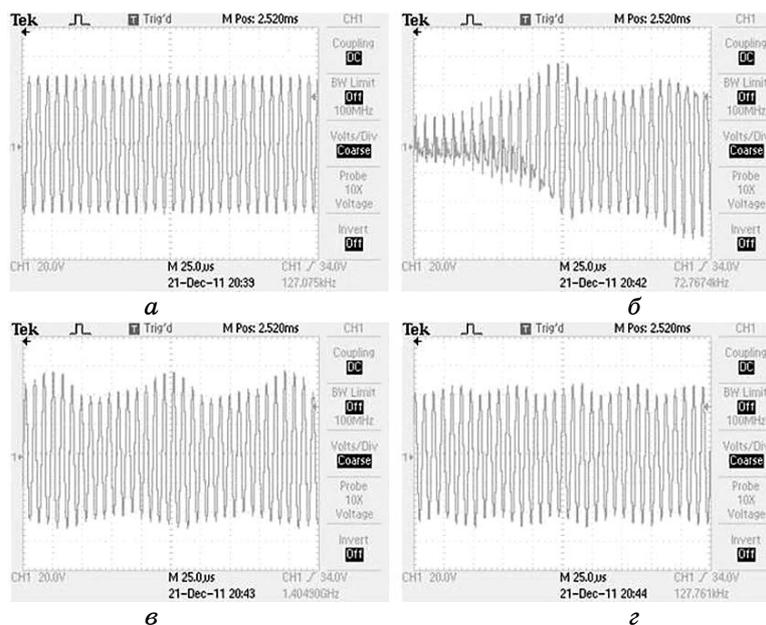
При частоте измеряемого магнитного поля немного меньшей частоты поля возбуждения феррорезонансного датчика мы получали данные о величине амплитуды измеряемого этого поля. При частоте измеряемого поля во много раз меньшей частоты возбуждения мы восстанавливали и форму изменения измеряемого поля во времени.

### **1.3. Результаты измерений характеристик феррозондовых датчиков**

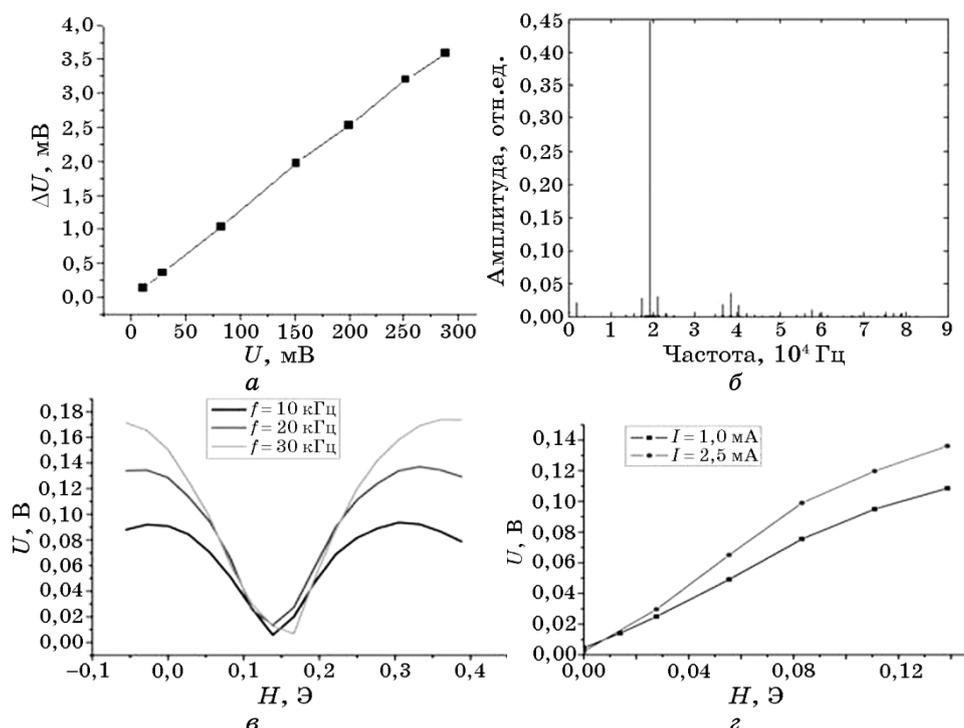
Используя макетный образец нашего магнитометра, мы провели исследования влияния амплитуды и частоты постоянного и переменного напряжения, которое подавалось на обмотку возбуждения феррозондовых датчиков, на величину чувствительности

этих датчиков. На рисунке 4 представлены осциллограммы для феррорезонансного датчика с сердечником из аморфной фольги в виде полоски  $20 \times 1,8$  мм и толщиной 20 мкм при разных частотах сменного магнитного поля.

Результаты измерений показали, что наши феррорезонансные датчики позволяют измерять как переменное, так и постоянное магнитное поле. Измеренная чувствительность датчика к постоянному магнитному полю достаточно большая, причём она сильно зависит от направления поля и возрастает при увеличении амплитуды высокочастотного сигнала, который подаётся на катушку возбуждения (рис. 5). При измерениях переменного магнитного поля использовался модулированный сигнал второй гармоники от частоты возбуждения феррозондового датчика и обработка Фурье-данных. Измерения проводились при различных частотах возбуждения от 20 до 300 кГц и измеряемых магнитных полях от 0 до 10 Э. На рисунке 5 представлен Фурье-образ сигнала с феррозондового датчика, работающего на частоте возбуждения 20 кГц в постоянном (0,037 Э) и переменном (0,055 Э) магнитных полях, которые создаются в катушках Гельмгольца постоянным током и переменным током с частотой 2 кГц.



**Рис. 4.** Осциллограммы выходного сигнала феррорезонансного датчика: *а* — внешнее магнитное поле  $H_i = 0$  Э; *б* —  $H_i(\omega_i) = 5$  Э,  $\omega_i = 2$  кГц; *в* —  $H_i(\omega_i) = 1$  Э,  $\omega_i = 10$  кГц; *г* —  $H_i(\omega_i) = 0,3$  Э,  $\omega_i = 20$  кГц. Частота возбуждения датчика 120 кГц.



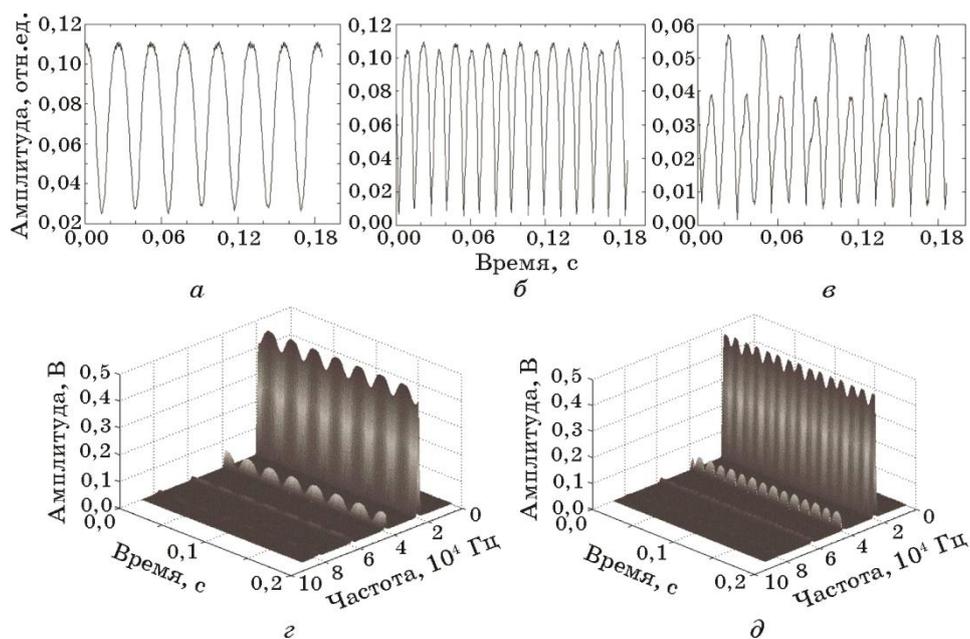
**Рис. 5.** Изменение разности в величине сигнала измеряемого феррорезонансным датчиком, которая возникает при ориентации датчика вдоль магнитного поля Земли и перпендикулярно к нему в зависимости от напряжения на обмотке возбуждения (а); изменение величины сигналов этого датчика  $f_-$  и  $f_+$  в области второй гармоники  $f_2 = 40$  кГц от амплитуды переменного  $f_i = 2$  кГц магнитного поля, действующего на датчик, для трёх частот возбуждения  $f_1 = 10$  кГц, 20 кГц и 30 кГц (в); изменение суммы сигналов датчика  $f_-$  и  $f_+$  в области второй гармоники  $f_2 = 40$  кГц под действием переменного  $f_i = 2$  кГц магнитного поля при разной амплитуде тока на возбуждающей катушке датчика  $I_1 = 1,0$  мА, и  $I_2 = 2,5$  мА (б); Фурье-образ сигнала с данного датчика в магнитном поле катушек Гельмгольца, которое создаётся постоянным 1 мА ( $H = 0,036$  Э) и переменным  $f_i = 2$  кГц током 1,5 мА ( $H = 0,055$  Э) при частоте возбуждения  $f_1 = 20$  кГц (г).

Измерения показывают, что в области частоты гармоник возбуждения возникают два дополнительных сигнала на частотах:  $f_- = f_n - f_i$  и  $f_+ = f_n + f_i$ , где  $f_n$  — частота возбуждения,  $f_i$  — частота измеряемого магнитного поля. Интересно отметить, что наблюдается различие в амплитудах сигналов  $f_-$  и  $f_+$ , которое возникает за счёт вклада магнитного поля Земли.

Когда частота измеряемого магнитного поля  $f_i$  намного меньше

частоты возбуждения феррозондового датчика  $f_1$ , при измерениях мы получали данные об амплитуде и форме изменения этого поля во времени. Для этого использовалось Фурье-преобразование в окне, которое сдвигается по времени. Ширина окна составляла 256 отсчётов при шаге сдвига в 128 отсчётов. Для каждого шага мы измеряли амплитуду второй гармоники и строили зависимость её от времени. Были проведены измерения магнитного поля  $f_i = 20\text{--}50$  Гц при частоте возбуждения феррозондовых датчиков  $f_1 = 20\text{кГц}$  и при разных режимах их работы. При измерениях на обмотку возбуждения датчиков мы подавали не только переменный электрический ток различной амплитуды, но и постоянный ток различной величины. Это позволяет сдвигать рабочую точку датчика по кривой чувствительности с линейного на нелинейный участок. На рисунке 6 представлена форма измеряемого магнитного поля при подаче на датчики постоянного тока  $I_0 = 1$  мА (точка линейности характеристики) и  $I_0 = 2,5$  мА (точка нелинейности характеристики) при трёх значениях амплитуды стабилизированного переменного электрического тока.

Видно, что при постоянном токе  $I_0 = 1$  мА форма сигнала измеряемого магнитного поля, практически, не искажается, в то



**Рис. 6.** Вид сигнала измеряемого переменного магнитного поля  $f_i = 40$  Гц при подаче на обмотку возбуждения датчика постоянного тока  $I_0 = 1$  мА (*a*, *г*) и  $I_0 = 2,5$  мА (*б*, *в*, *д*) и переменного тока с амплитудой  $I_1 = 1$  мА (*a*, *б*, *г*) и  $I_2 = 0,25$  мА (*в*), и  $I_3 = 2,5$  мА (*д*).

время как при  $I_0 = 2,5$  мА (точка нелинейности характеристики чувствительности) сигнал сильно искажается и представляет сумму двух полупериодов.

Обработка результатов измерений показывает, что феррозондовые датчики с магнитным сердечником на основе тонкой аморфной фольги ММ-5Со и ММ-3Со имеют высокую чувствительность. Изменяя величину переменного и постоянного тока, подаваемого на обмотку возбуждения таких феррозондовых датчиков, можно управлять их величиной коэффициента магнитоэлектрического преобразования  $k_{EH}$ , а также переводить его из линейного режима работы в нелинейный режим работы. При линейном режиме работы эти датчики позволяют измерять амплитуду и форму сигнала измеряемого переменного магнитного поля, частота которого намного меньше собственной частоты возбуждения датчика. Все эти результаты хорошо согласуются с теоретическими зависимостями (1) и (2).

Понятно, что для практического использования необходимо предварительно градуировать наши феррозондовые датчики. В таблице 2 представлены результаты определения средней величины коэффициента магнитоэлектрического преобразования наших феррозондовых датчиков.

Оценка порога чувствительности наших датчиков по формуле [3]

$$H_p = \frac{2\sqrt{kTRF}}{k_{EH}}, \quad (5)$$

где  $R$  — активное сопротивление катушки регистрации сигнала,  $F$  — ширина полосы рабочей частоты датчика,  $T$  — температура,  $k_{EH}$  — коэффициент магнитоэлектрического преобразования,  $k$  — постоянная Больцмана, показывает, что при  $R \approx 1$  Ом,  $F = 200$  кГц и  $k_{EH} \approx 1$  В/Э порог чувствительности наших датчиков ниже  $H_p \ll 1$  нТ.

**ТАБЛИЦА 2.** Величина коэффициента магнитоэлектрического преобразования феррозондовых датчиков.

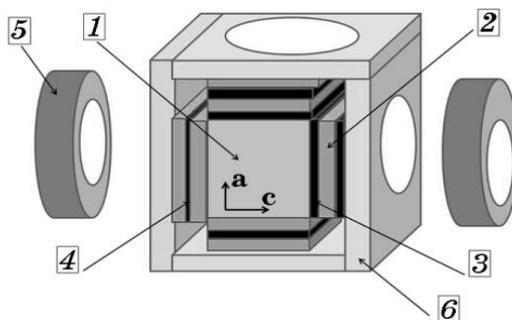
$k_{EH}$ , В/Э	$f = 10$ кГц	$f = 20$ кГц	$f = 30$ кГц
Без постоянного тока возбуждения	0,8	0,9	1,4
При постоянном токе возбуждения $I = 1$ мА	0,87	1,1	1,5
При постоянном токе возбуждения $I = 2,5$ мА	1,4	1,6	2,1

Необходимо отметить, что очень большое значение магнитной проницаемости и низкие магнитные поля насыщения, и малая толщина тонкой аморфной фольги ММ-5Со и ММ-3Со позволяют использовать в датчиках с сердечником из такой фольги миниатюрные катушки с малым числом витков. Все это даёт возможность значительно увеличить частоту возбуждения феррорезонансных датчиков с сердечником из тонкой аморфной фольги ММ-5Со и ММ-3Со и получать на основе этих материалов миниатюрные датчики для измерения магнитного поля с высокой чувствительностью в широкой области рабочих частот.

## 2. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ NiMnGa

Кроме феррозондовых датчиков на основе аморфной фольги ММ-5Со и ММ-3Со, нами были проведены исследования по созданию магнитоэлектрических датчиков магнитного поля на основе магнитных мартенситных материалов. Полученные результаты позволили разработать конструкцию и изготовить макетные образцы малогабаритных магнитоэлектрических датчиков [3], где используется магниточувствительный элемент из магнитного мартенситного монокристаллического материала NiMnGa. Схема нашего магнитоэлектрического датчика показана на рис. 7.

Принцип работы магнитоэлектрических датчиков [4] состоит в том, что в них под воздействием измеряемого магнитного поля происходит движение, или деформация магниточувствительного элемента, в результате чего генерируется электрическое напряжение на сигнальных катушках или пьезоэлектрических элементах. Особенностью наших магнитоэлектрических датчиков является то, что в качестве магниточувствительного элемента в нём



**Рис. 7.** Схема магнитоэлектрического датчика: 1 — кристалл NiMnGa, 2 — пьезокерамические элементы, 3 — электроды заземления, 4 — сигнальные электроды, 5 — катушки подмагничивания, 6 — корпус.

используется мартенситный монокристалл NiMnGa, который находится в многодоменном (двойниковая структура) состоянии. Двойниковая структура формируется в мартенситной фазе кристалла NiMnGa при его одноосном сжатии [5].

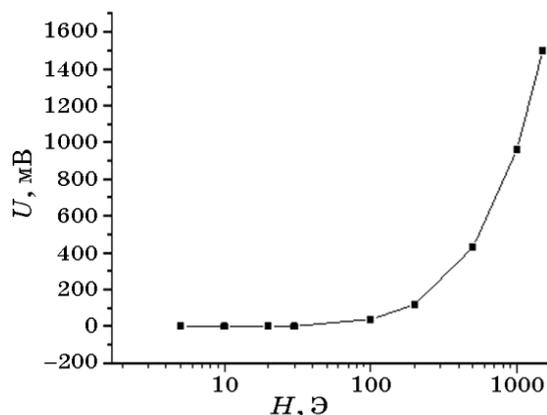
Работает наш датчик следующим образом. Под действием измеряемого магнитного поля  $H_i$ , направленного вдоль направления  $c$ , длина кристалла NiMnGa в этом направлении увеличивается и тем самым создаёт дополнительное давление на пары пьезоэлементов, которые ориентированы перпендикулярно к этому направлению. Одновременно размер этого кристалла вдоль направления  $a$  уменьшается, что приводит к снижению давления на вторую пару пьезоэлементов, которые ориентированы перпендикулярно к направлению  $a$ . Увеличение/уменьшение давления на пары пьезоэлементов приводит к увеличению/уменьшению напряжения электрического поля на соответствующих электродах 4 относительно корпуса датчика и электродов 3. Если считать, что величина сигнала, генерируемого пьезоэлементами, пропорциональна величине пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$  пьезоэлементов датчика, то напряжение электрического поля, снимаемого с нашего датчика, можно определить как

$$\Delta U(t) = \gamma \frac{dP}{dt} \Delta P(t) = \gamma d_{33} \frac{d}{dt} \left[ \frac{dP}{dH} \Delta H(t) \right], \quad (6)$$

где  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности.

Особенностью работы нашего магнитоэлектрического датчика является то, что в области слабых магнитных полей величина давления, создаваемого кристаллом NiMnGa на пьезоэлементы, нелинейно зависит от поля [6]. Результаты измерений давления, создаваемого кристаллом Ni<sub>51</sub>Mn<sub>28</sub>Ga<sub>21</sub> под действием слабого низкочастотного (25 Гц) магнитного поля, представленные на рис. 8, подтверждают этот факт.

Будем считать, что на наш датчик действует сильное постоянное магнитное поле  $H_0$ , очень слабое стабилизированное, высокочастотное модулирующее магнитное поле  $H_1(t) = H_1 \sin(\omega_1 t)$ , а также слабое измеряемое магнитное поле  $H_i(t) = H_i \sin(\omega_i t)$  ( $H_0 \gg \gg H_i > H_1$ ,  $\omega_1 \gg \omega_i$ ). Будем считать, что из-за малости амплитуды поле  $H_1(t)$  практически не изменяет величину  $dP/dH$ . Максимальная амплитуда снимаемого с нашего датчика сигнала на частоте модулирующего поля будет в тот момент, когда направление измеряемого магнитного поля совпадает с направлением постоянного поля при  $H_{\max} = H_0 + H_i$ . Соответственно минимальная амплитуда этого сигнала будет в противоположном случае при  $H_{\min} = H_0 - H_i$ . Разность сигналов для такого случая запишется как



**Рис. 8.** Зависимость напряжения на пьезоэлементах от амплитуды переменного (25 Гц) магнитного поля, которое действует на кристалл  $\text{Ni}_{51}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{21}$ .

$$U(t) = \gamma d_{33} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{dP}{d(H_0 + H_i)} [H_0 + H_i(t) + H_1(t)] - \frac{dP}{d(H_0 - H_i)} [H_0 - H_i(t) + H_1(t)] \right\}. \quad (7)$$

Значение производной в первом приближении можно записать через вторую производную и амплитуду поля  $H_i$ :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d(H_0 + H_i)} &= \frac{dP}{d(H_0)} + \left( \frac{d^2 P}{d^2 H} \right)_0 H_i, \\ \frac{dP}{d(H_0 - H_i)} &= \frac{dP}{d(H_0)} - \left( \frac{d^2 P}{d^2 H} \right)_0 H_i; \end{aligned} \quad (8)$$

тогда с учётом того, что вторая производная давления по полю не зависит от времени, получим

$$\begin{aligned} U(t) &= 2\gamma d_{33} \frac{d}{dt} \left( \frac{d^2 P}{d^2 H} \right)_0 [H_0 H_i + H_i H_1 \sin(\omega_1 t)] = \\ &= 2\gamma d_{33} \left( \frac{d^2 P}{d^2 H} \right)_0 \omega_1 H_i H_1 \cos(\omega_1 t). \end{aligned} \quad (9)$$

Когда измеряемое магнитное поле  $H_i(t) = H_i \sin(\omega_1 t)$  значительно меньше модулирующего поля  $H_1(t) = H_1 \sin(\omega_1 t)$  ( $H_0 \gg H_1 > H_i$ ,

$\omega_1 \gg \omega_i$ ), аналогичное рассмотрение даёт:

$$U(t) = 2\gamma d_{33} \left( \frac{d^2 P}{d^2 H} \right)_0 \omega_i H_i H_1 \cos(\omega_i t). \quad (10)$$

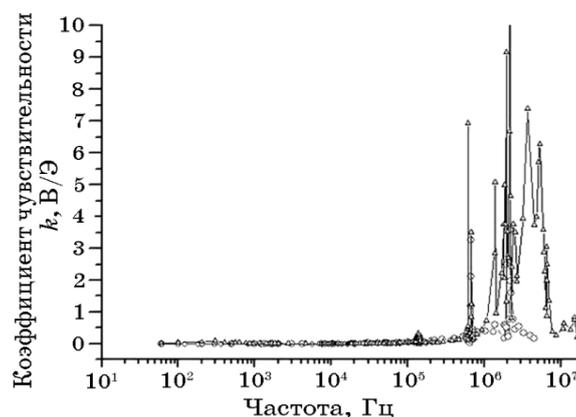
Из уравнений (9) и (10) видно, что с помощью нашего датчика в зависимости от условий возбуждения мы можем измерять амплитуду и форму исследуемого магнитного поля. Изменяя величину постоянного поля можно изменять чувствительность датчика за счёт перемещения точки  $H_0$  по кривой зависимости давления от поля, то есть за счёт изменения величины второй производной на этой характеристике.

В конструкции нашего датчика постоянное и высокочастотное модулирующее магнитное поле подавалось на чувствительный элемент с помощью малогабаритных катушек 5 (см. рис. 7), размещённых с противоположных сторон этого элемента. Пьезоэлементы 2 изготавливаются из мягкой пьезокерамики с большим значением коэффициента прямого пьезоэффекта  $d_{33}$ . Эти пьезоэлементы устанавливаются попарно таким образом, что их поляризация направлена навстречу друг другу. В плоскости соединения этих элементов устанавливался плоский сигнальный электрод 3. При сжатии всех четверых пар пьезоэлементов на электроде 3 генерируется заряд одного знака: плюс, или минус. Пьезоэлементы улавливаются напротив тех граней призмы из кристалла NiMnGa, расстояние между которыми наиболее сильно изменяется под действием постоянного магнитного поля.

Измерения чувствительности нашего магнитоэлектрического датчика проводились по схеме, представленной на рис. 3. При регистрации сигналов с нашего датчика две пары пьезоэлементов соединялись параллельно и использовались как генератор заряда, что позволило получить, за счёт высокой ёмкости, большую чувствительность и меньший уровень шумов в нашем датчике. На рисунке 9 представлена частотная зависимость коэффициента магнитоэлектрического преобразования нашего магнитоэлектрического датчика.

Результаты измерений показывают, что наш датчик имеет достаточно хорошую чувствительность  $k \approx 0,01$  В/Э, и его чувствительность почти не меняется вплоть до частот близких к резонансной частоте наших пьезокерамических элементов.

Понятно, что высокое активное сопротивление пьезоэлементов повышает порог чувствительности рассмотренных магнитоэлектрических датчиков. Оценки показывают, что величина пороговой чувствительности (см. формулу (5))  $H_p \approx 10^{-6}$  Т. Кроме того, при эксплуатации рассмотренных магнитоэлектрических датчиков нужно хорошо экранировать пьезоэлементы. В своих иссле-



**Рис. 9.** Частотная зависимость коэффициента чувствительности нашего датчика.

дованиях мы использовали гибкий экран. Однако достоинством таких датчиков является достаточно большая амплитуда выходных сигналов, а также то, что описанный датчик позволяет проводить измерения магнитного поля по двум координатам. Правда, это приводит к усложнению электронной схемы и принципа обработки сигналов.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Крупа, Ю. Б. Скирта, А. А. Дейна, *Магнитометр*: Патент Украины № 106276. МПК G01R 33/05 (2006.01) (Опубликовано 11 августа 2014. Бюл. № 15).
2. Ю. В. Афанасьев, *Феррозондовые приборы* (Ленинград: Энергоатомиздат: 1986), с. 188.
3. Н. Н. Крупа, Ю. Б. Скирта, И. В. Шарай, *Магнитоэлектрический датчик магнитного поля*: Патент Украины № 106286. МПК G01R 33/00 (2014.01) (Опубликовано 11 августа 2014. Бюл. № 15).
4. М. И. Бичурин, Ю. В. Килиба, *Датчик постоянного магнитного поля*: Патент РФ № 2244318. МПК G01R 33/02 (Опубликовано 10 января 2005).
5. P. Mullner, V. A. Chernenko, and G. Kostorz, *Scr. Mater.*, **49**: 129 (2003).
6. V. L'vov, S. Kustov, and E. Cesar, *Acta Mater.*, **56**: 802 (2008).

#### REFERENCES

1. M. M. Krupa, Yu. B. Skirta, and O. A. Deina, *Magnetometer*: Patent 106276 UA. IPC G01R 33/05 (2006.01) (Published 11 August 2014. Bull. No. 15) (in Ukrainian).
2. Yu. V. Afanas'ev, *Ferrozondovyye Pribory* [Fluxgate Devices] (Leningrad:

- Energoatomizdat: 1986), P. 188 (in Russian).
3. M. M. Krupa, Yu. B. Skirta, and I. V. Sharai, *Magnitoelektricheskiy Datchik Magnitnogo Polya* [Magnetic Field Magnetoelectric Sensor]: Patent 106286 UA. IPC G01R 33/00 (2014.01) (Published 11 August 2014. Bull. No. 15) (in Ukrainian).
  4. M. I. Bychurin and Yu. V. Kiliba, *Datchik Postoyannogo Magnitnogo Polya* [A Constant Magnetic Field Magnetoelectric Sensor]: Patent 2244318 RU. IPC G01R 33/02 (Published 10 January 2005) (in Russian).
  5. P. Mullner, V. A. Chernenko, and G. Kostorz, *Scr. Mater.*, **49**: 129 (2003).
  6. V. L'vov, S. Kustov, and E. Cesar, *Acta Mater.*, **56**: 802 (2008).