

УДК 620.179.14

## К РАСЧЕТУ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДАТЧИКА МЕТАЛЛОДЕТЕКТОРА

Букреев В.В., Безкоровайный В.С., Яковенко В.В.

## CALCULATION OF TRANSFER FUNCTION OF THE MAGNETIC SENSOR SYSTEM OF RADIO-METAL LOCATOR.

Bukreev V., Bezkorovainy V., Yakovenko V.

*Описан метод построения магнитной системы датчика для обнаружения ферромагнитных тел в немагнитных средах. Магнитная система датчика содержит концентратор магнитного поля, в воздушном зазоре которого помещен феррозонд с кольцевым сердечником. Разработана математическая модель магнитной системы, устанавливающая функциональную связь между размерами и положением в пространстве ферромагнитного тела и магнитным потоком в магнитопроводе датчика. Приведены результаты численного и натурного экспериментов.*

**Ключевые слова:** феррозонд, металлодетектор, магнитопровод, математическая модель, интегральные уравнения, функция преобразования, эксперимент.

**Введение.** По сравнению с электромагнитными детекторами магнитные детекторы ферромагнитных тел (ФТ) имеют более низкий порог чувствительности и, в большинстве случаев, не нуждаются в намагничивающих устройствах. Малое распространение магнитные детекторы имеют из-за сложности устройств обработки выходных сигналов измерительных преобразователей и отсутствия основ теории построения самих преобразователей. В качестве измерительного преобразователя можно использовать феррозонд [1] со стержневыми сердечниками, однако более перспективной магнитной системой является феррозонд с кольцевым сердечником, помещенным в воздушный зазор концентратора магнитного поля. В статье рассматривается принцип построения такой магнитной системы металлодетектора и ее математическая модель, необходимая для расчета функции преобразования.

**Целью работы** является построение математической модели магнитной системы измерительного преобразователя с феррозондом в качестве магниточувствительного элемента.

**Математическая модель магнитной системы измерительного преобразователя.** При реальных условиях функционирования металлодетектора линейные размеры ФТ значительно (в 30-50 раз) меньше его расстояния до измерительного преобразователя. В этом

случае поле, индуцированное ФТ, для упрощения расчетов, целесообразно аппроксимировать полем более простых магнитных структур (диполем, квадруполем, сферой и т.п.).

В рассматриваемом способе обнаружения ФТ используется магнитная система измерительного преобразователя, при которой нельзя рассматривать измерение составляющей магнитного поля как измерение “в точке”.

Поэтому для учета геометрических параметров магнитной системы измерительного преобразователя рационально использовать теорему о взаимности [1], согласно которой магнитный поток в сердечнике измерительного преобразователя равен

$$\Phi = \frac{\mu_0}{iw} \int_V \bar{H}_\Phi \bar{M} dV, \quad (1)$$

где  $i\omega$  – ампер-витки обмотки измерительного преобразователя;

$\bar{H}_\Phi$  – вектор напряженности магнитного поля создаваемого измерительным преобразователем в объеме ФТ;

Если считать, что значение  $\bar{H}_\Phi$  по объему ФТ постоянно, то

$$\Phi = \frac{\mu_0}{iw} \bar{H}_{\Phi cp} \int_V \bar{M} dV, \quad (2)$$

где  $\bar{H}_{\Phi cp}$  – среднее по объему ФТ значение вектора напряженности.

Учитывая, что магнитный момент ФТ определяется как

$$\bar{m} = \int_V \bar{M} dV, \quad (3)$$

(1) можно записать так

$$\Phi = \frac{\mu_0 \cdot \bar{m} \cdot \bar{H}_{\Phi cp}}{iw}. \quad (4)$$

Целесообразно [2] магниточувствительный элемент, которым является феррозонд с кольцевым сердечником, поместить в зазор между двумя ферромагнитными стержнями прямоугольного сечения (рис.1).

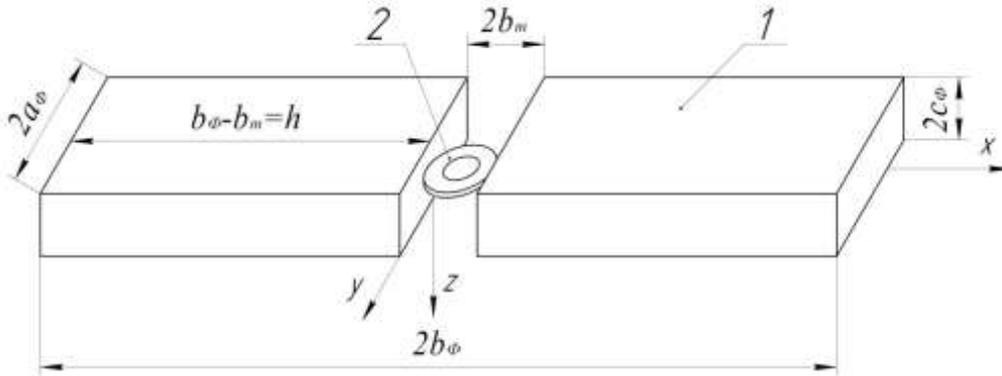


Рис. 1 Концентратор магнитного поля:  
1 – стержни концентратора; 2 – феррозонд.

Для  $x$ -составляющей вектора напряженности магнитного поля, генерируемой обмоткой с током, расположенной на сердечнике, совпадающей с осью сердечника справедливо следующее соотношение: [2]

$$\begin{aligned}
 H_{\phi x} = \frac{\delta}{4\pi} & \left[ \operatorname{arctg} \frac{(x-x_j)(y-y_j)}{(z-c_\phi)\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-c_\phi)^2}} \Big|_{-a_\phi}^{a_\phi} \Big|_{-b_\phi}^{b_\phi} - \right. \\
 & - \operatorname{arctg} \frac{(x-x_j)(y-y_j)}{(z+c_\phi)\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z+c_\phi)^2}} \Big|_{-a_\phi}^{a_\phi} \Big|_{-b_\phi}^{b_\phi} + \\
 & + \operatorname{arctg} \frac{(x-x_j)(z-z_j)}{(y-a_\phi)\sqrt{(x-x_j)^2+(y-a_\phi)^2+(z-z_j)^2}} \Big|_{-b_\phi}^{b_\phi} \Big|_{-c_\phi}^{c_\phi} - \\
 & \left. - \operatorname{arctg} \frac{(x-x_j)(z-z_j)}{(y+a_\phi)\sqrt{(x-x_j)^2+(y+a_\phi)^2+(z-z_j)^2}} \Big|_{-b_\phi}^{b_\phi} \Big|_{-c_\phi}^{c_\phi} \right]; \quad (5)
 \end{aligned}$$

здесь  $\delta = iw \left( \frac{1}{2b_k} + \frac{m_\phi}{2b_\phi} \right)$ ;

$2b_k$  – длина обмотки  $iw$ ;

$m_\phi$  – проницаемость формы сердечника.

При этом полагается, что сердечник феррозонда не влияет на магнитную проводимость зазора. Проницаемость формы сердечника с воздушным зазором определяется следующим образом. Рассчитывается проницаемость формы сердечника концентратора без воздушного зазора по формуле [1]

$$m'_\phi = \frac{\pi \cdot b_\phi^2}{4a_\phi c_\phi \left( \ln \frac{3,6 \cdot b_\phi}{a_\phi + c_\phi} - 1 \right)} \quad (6)$$

Находится магнитная проницаемость сердечника

$$\mu'_\phi = \frac{\mu \cdot m'_\phi}{\mu + m_\phi},$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость ферромагнитного материала сердечников концентратора.

Затем полагается, что имеется замкнутый сердечник с магнитной проницаемостью  $\mu'_\phi$ , в котором присутствует воздушный зазор шириной  $2b_m$ . Тогда согласно второму закону Кирхгофа справедливо

$$iw = H_b \cdot 2l_m + H_c \cdot 2b_\phi,$$

откуда следует

$$\mu_\phi = \frac{m_\phi \cdot \mu'_\phi}{m_\phi + \mu'_\phi}, \quad (7)$$

где  $m_\phi = \frac{l_m}{l_\phi}$ .

Пусть ФТ намагничивается магнитным полем напряженностью  $\vec{H}_0$ . Расчет поля намагниченности в объеме ФТ производится путем решения следующего интегрального уравнения [3]

$$\vec{H}(\mathcal{Q}) = \frac{1}{4\pi} \left[ \int_S \frac{\vec{M} \cdot \vec{1}_n \cdot \vec{R}_{PQ}}{R_{PQ}^3} dS - \int_V \frac{\text{div} \vec{M} \cdot \vec{R}_{PQ}}{R_{PQ}^3} dV \right] + \vec{H}_0(\mathcal{Q}), \quad (8)$$

здесь

$P, Q$  – точки источника и наблюдения;

$\vec{R}_{PQ}$  – вектор из точки источника в точку

наблюдения;

$\vec{M}$  – вектор намагниченности;

$\vec{1}_n$  – единичный вектор нормали к поверхности ФТ;

$V, S$  – объем и поверхность ФТ;

$\vec{H}_0$  – вектор напряженности намагничивающего поля.

При кусочно-постоянной аппроксимации функции  $\vec{M}$  по объему ФТ уравнение (8) редуцируется к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\vec{H}_i = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^6 (\vec{M}_j \cdot \vec{1}_{njk}) \int_{S_{jk}} \frac{\vec{R}_{ji}}{R_{ji}^3} dS'_{jk} + \vec{H}_{0i}, \quad (9)$$

где  $N$  – количество элементарных объемов (ЭО) параллелепипедов, на которые разбивается объем ФТ;

$S_{jk}$  –  $k$ -ая поверхность ЭО.

Решением (9) являются значения составляющих вектора  $\vec{M}$  в каждой  $i$ -ой точке.

Вектор  $\vec{H}_p$  размагничивающего поля рассчитывается согласно следующему соотношению:

$$\vec{H}_p = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^6 (\vec{M}_j \cdot \vec{1}_{njk}) \int_{S_{jk}} \frac{\vec{R}_{ji}}{R_{ji}^3} dS_{jk}. \quad (10)$$

Размагничивающий фактор для каждого ЭО будет равен

$$N = \frac{H_p}{M_p}.$$

или

$$N_x = \frac{H_{px}}{M_x}; N_y = \frac{H_{py}}{M_y}; N_z = \frac{H_{pz}}{M_z}. \quad (11)$$

Полагается, что величина  $N$  для каждого ЭО и направления вектора  $\vec{H}_0$  остается величиной постоянной. Математическая модель каждого ЭО в процессе намагничивания может быть представлена структурной схемой, которая приведена на рис. 2 для координаты  $x$  ( $\chi$  – магнитная восприимчивость ферромагнитного материала).

$$H_x = H_{0x} - H_{px}$$

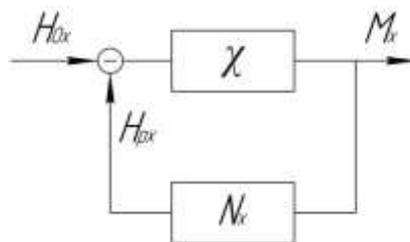


Рис. 2 Структурная схема намагничивания ЭО

Согласно структурной схеме

$$M = \frac{H_{0x} \cdot \chi}{1 + \chi \cdot N_x}; H_x = \frac{H_{0x}}{1 + \chi \cdot N_x}. \quad (12)$$

Благодаря вводу коэффициента размагничивания нет необходимости при изменении вектора  $\vec{H}_0$  заново решать систему уравнений (9), а по известному значению внешнего (стороннего) поля и известному для каждого ЭО коэффициенту размагничивания составить и решить следующие алгебраические уравнения.

$$\begin{aligned} N_{xi} M_{xi}(H) + H_{xi} &= H_{0xi}; \\ N_{yi} M_{yi}(H) + H_{yi} &= H_{0yi}; \\ N_{zi} M_{zi}(H) + H_{zi} &= H_{0zi}. \end{aligned} \quad (13)$$

Результатом решения уравнений (13) являются величины  $H_{xi}, H_{yi}, H_{zi}$ , а,

следовательно, и  $M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}$ . В линейном случае  $M_i(H) = \chi \cdot H_i$ .

При расчете остаточного значения намагниченности, то есть при  $\vec{H}_0 = 0$  уравнения (11) трансформируются в следующие соотношения:

$$\begin{aligned} N_{xi} M_{xi}(H) + H_{xi} &= 0; \\ N_{yi} M_{yi}(H) + H_{yi} &= 0; \\ N_{zi} M_{zi}(H) + H_{zi} &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

После расчета значений  $M_i$  определяется магнитный момент ФТ:

$$\vec{m} = \vec{1}_x \sum_{i=1}^N M_{xi} \Delta V_i + \vec{1}_y \sum_{i=1}^N M_{yi} \Delta V_i + \vec{1}_z \sum_{i=1}^N M_{zi} \Delta V_i \quad (15)$$

здесь  $\Delta V_i$  – объем  $i$ -ого ЭО.

В геометрическом центре каждого  $i$ -ого ЭО рассчитываются составляющие вектора  $\vec{H}_\phi$  и находится их среднее значение:

$$\vec{H}_{\phi cp} = \bar{I}_x \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{\phi xi} + \bar{I}_y \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{\phi yi} + \bar{I}_z \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{\phi zi} \quad (16)$$

По формуле (4) определяется магнитный поток в сердечнике концентратора магнитного поля.

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре концентратора рассчитывается по следующей формуле:

$$H_n = \frac{\Phi}{4 \cdot a_\phi \cdot c_\phi \cdot \mu_0}, \quad (17)$$

что и является информативным параметром.

В зависимости от положения ФТ в пространстве векторы  $\vec{H}_\phi$  и  $\vec{M}$  также имеют различную ориентацию. Далее рассматривается случай, когда  $\vec{M} = \bar{I}_x \cdot \vec{M}_x$  и  $\vec{H}_\phi = \bar{I}_x \cdot \vec{H}_x$ , тогда

$$\bar{m} = \bar{I}_x \cdot \sum_{i=1}^N \bar{M}_{xi} \cdot \Delta V_i,$$

а величина  $\vec{H}_{\phi x}$  рассчитывается по формуле (5).

**Результаты численного и натурального экспериментов.** Для проведения численного и натурального экспериментов использовалась магнитная система измерительного преобразователя, параметры которой приведены в таблице 1. В этой же таблице приведены результаты экспериментов.

Таблица 1

**Параметры магнитной системы металлодетектора**

$2a_\phi, \text{м}$	$2b_\phi, \text{м}$	$2c_\phi, \text{м}$	$2b_m, \text{м}$	$\phi, \text{Вб,}$ расчет	$U_2, \text{В}$ расчет	$U_2, \text{В}$ эксперимент
0,014	0,174	0,01	0,014	$1,4 \cdot 10^{-10}$	0,014	0,013
0,014	0,214	0,01	0,014	$1,8 \cdot 10^{-10}$	0,022	0,021
0,14	0,314	0,01	0,014	$2,3 \cdot 10^{-10}$	0,026	0,024

Геометрические размеры ФТ в виде параллелепипеда, выполненного из стали 20,  $0,02 \times 0,04 \times 0,01$  м. Кольцевой сердечник феррозонда имеет радиус  $R_\phi = 0,005$  м. Намагничивающее поле  $H_0 = 100$  А/м. Без концентратора выходное напряжение феррозонда составило 0,009 В. Коэффициент преобразования феррозонда  $G = 0,08$  В·м/А.

Как показывают результаты эксперимента, применение концентраторов увеличивает чувствительность преобразователя в 1,5-2,5 раза. Расхождение между расчетными данными и результатами эксперимента не превышает 9%.

**Выводы:**

1. Разработана математическая модель магнитной системы металлодетектора предназначенного для обнаружения ФТ в немагнитной среде, дающая возможность установить функциональную связь между размерами и положением в пространстве ферромагнитного тела и магнитным потоком в сердечнике магниточувствительного элемента.

2. Применение в магнитной системе измерительного преобразователя концентратора магнитного поля увеличивает чувствительность магнитной системы в 1,5-2,5 раза.

**Литература**

1. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 186 с.

2. Букреев В.В. К выбору размеров ферромодуляционных датчиков при измерении неоднородных магнитных полей / В.В. Букреев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика випуск 79. – Донецьк: ДВНЗ «ДОНТУ», 2004.

3. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей/ П.А. Курбатов, С.А. Аринчин – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 167 с.

**References**

1. Afanas'ev Ju.V. Ferrozondivye pribory. L.: Jenergoatomizdat, 1986. – 186 s.  
2. Bukreev V.V. K vyboru razmerov ferromoduljacionnyh datchikov pri izmerenii neodnorodnyh magnitnyh polej / V.V. Bukreev // Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu. Serija: “Elektrotehnika i energetika vipusk 79. – Donec'k: DVNZ «DonNTU», 2004.  
3. Kurbatov P.A., Arinchin S.A. Chislennyj raschet jelektromagnitnyh polej/ P.A. Kurbatov, S.A. Arinchin – M.: Jenergoatomizdat. – 1984. – 167 s.

**Букреев В.В., Безкорвайний В.С., Яковенко В.В.**

**ДО РОЗРАХУНКУ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ДАТЧИКА МЕТАЛОДЕТЕКТОРА**

*Описаний метод побудови магнітної системи датчика для виявлення феромагнітних тіл в немагнітних середовищах. Магнітна система датчика містить концентратор магнітного поля, в повітряному зазорі якого поміщений ферозонд з кільцевим сердечником. Розроблена математична модель магнітної системи, що встановлює функціональний зв'язок між розмірами і положенням в просторі феромагнітного тіла і магнітним потоком в*

магнітопроводі датчика. Приведені результати чисельного і натурального експериментів.

**Ключові слова:** ферозонд, металодетектор, магнітопровід, математична модель, інтегральні рівняння, функція перетворення, експеримент.

**V.V. Bukreev, V.S. Bezkorovainy,**

**V.V. Yakovenko**

**CALCULATION OF TRANSFER FUNCTION OF THE MAGNETIC SENSOR SYSTEM OF RADIO-METAL LOCATOR**

*The method to construct a magnetic sensor system for the detection of ferromagnetic solids in non-magnetic environment was described. Magnetic sensor system includes a concentrator of the magnetic field in the air gap of which the ferroprobe with ring core is placed. A mathematical model of the magnetic system, establishing a functional link between the size and position in space of a ferromagnetic body and the magnetic flux in the magnetic*

*sensor was developed. The results of numerical and natural experiments was brought.*

**Keywords:** ferroprobe, radio-metal locator, magnetic conductor, mathematical model, integral equations, the conversion function, experiment.

**Букрєєв В.В.** – к.т.н., доцент кафедри математического анализа

**Яковенко В.В.** – д.т.н., проф., заведуючий кафедрой электромеханики ЧНУ им. В.Даля

**Безкоровайний В.С.** – аспірант кафедри электромеханики ЧНУ им. В.Даля

**Рецензент:** Соколов Володимир Ілліч – докт. техн. наук, професор, директор Інституту прикладної механіки і матеріалознавства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля.