

К ВЫБОРУ РАЗМЕРОВ ФЕРРОМОДУЛЯЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ НЕОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Букреев В.В.

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

uni@snu.edu.ua

The article deals with the methods of flux calculation in the core of the flux gate designed for measuring magnetizing force. The proposed methods consider the parameters of inhomogeneous field sources and allow to choose the length of grid core of flux gate in order to heighten its sensibility.

Большинство исследований по ферроимпульсионным датчикам (ФД) со стержневыми сердечниками (феррозондам) касается измерения однородных полей [1]. В то же время в дефектоскопии, в контрольных устройствах, в металлоискателях ФД применяются для измерения напряженности неоднородных полей. Имеются публикации, в которых приводятся результаты исследований по измерению неоднородных полей феррозондами, включенными по схеме градиентометра. Сам источник неоднородного поля при этом не рассматривается. Эффективность измерения неоднородных полей можно повысить, если учитывать параметры источников неоднородного магнитного поля [2]. Под эффективностью здесь понимается чувствительность ФД.

Источниками неоднородного магнитного поля могут быть как проводники с током, так и постоянные магниты, в том числе намагниченные ферромагнитные тела (ФТ), ФТ, находящиеся в поле Земли, трещины в ферромагнитном металле и т.п.

Для определения магнитного потока в ФД со стержневыми сердечниками или сердечниками с модулятором может быть использована теорема о взаимности К.М. Поливанова [2], которая формулируется в виде следующего соотношения

$$\Phi = \frac{\mu}{i\omega} \int_V \vec{H} \cdot \vec{M} dV, \quad (1)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля, создаваемого магнитной системой, i, ω – ток и количество витков в магнитной системе, \vec{M} – намагниченность ФТ, V – объем ФТ, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

В первом приближении величину магнитного потока можно определить, аппроксимируя поле намагниченного ФТ полем диполя. Тогда (1) переписывается так

$$\Phi \approx \frac{\mu_0}{i\omega} \vec{H} \cdot \vec{m}, \quad (2)$$

где $\vec{m} = \vec{M} \cdot V$.

Формулу (1) также можно преобразовать следующим образом. С учетом того, что

$$\vec{H} = -\text{grad } \varphi_m,$$

где φ_m – скалярный потенциал магнитного поля, (1) запишется так

$$\Phi = -\frac{\mu_0}{i\omega} \int_V \text{grad } \varphi_m \cdot \vec{M} dV. \quad (3)$$

Поскольку

$$\text{div}(\varphi_m \cdot \vec{M}) = \varphi_m \text{div } \vec{M} + \text{grad } \varphi_m \cdot \vec{M},$$

то выражение (3) можно записать в виде

$$\Phi = \frac{\mu_0}{i\omega} \left[- \int_V \text{div}(\varphi_m \cdot \vec{M}) dV + \int_V \varphi_m \text{div } \vec{M} dV \right].$$

Полагая, что внутри ФТ $\text{div } \vec{M} = 0$, приходим к следующему выражению

$$\Phi = -\frac{\mu_0}{i\omega} \int_V \text{div}(\varphi_m \cdot \vec{M}) dV$$

или

$$\Phi = -\frac{\mu_0}{i\omega} \oint_S \varphi_m M_n dS, \quad (4)$$

где M_n – нормальная составляющая намагниченности на поверхности ФТ.

Как видно из формул (1), (2), (4) магнитный поток при постоянных параметрах намагниченного ФТ зависит только от параметров магнитной системы ФД, которая создает магнитное поле с вектором напряженности \vec{H} .

Составляющая вектора напряженности магнитного поля, направленная вдоль оси сердечника (ось Ox) может быть рассчитана по формуле [3]:

$$H_x = \frac{\delta}{4\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(x-x_j)(y-y_j)}{(z-c)\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-c)^2} \Big|_{-a-b}^a - \operatorname{arctg} \frac{(x-x_j)(y-y_j)}{(z+c)\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z+c)^2} \Big|_{-a-b}^a + \operatorname{arctg} \frac{(x-x_j)(z-z_j)}{(y-a)\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-a)^2 + (z-z_j)^2} \Big|_{-b-c}^b - \operatorname{arctg} \frac{(x-x_j)(z-z_j)}{(y+a)\sqrt{(x-x_j)^2 + (y+a)^2 + (z-z_j)^2} \Big|_{-b-c}^b \right], \quad (5)$$

где $2a, 2b, 2c$ – размеры сердечника,

$$\delta = i\omega \left(\frac{1}{2b_k} + \frac{m}{2b} \right),$$

$2b_k$ – длина катушки, m – проницаемость формы сердечника, которая для сердечника с сечением прямоугольной формы может быть рассчитана по формуле

$$m = \frac{\pi(b^2 - 0.25b_k^2)}{8ac \left(\ln \frac{1.8b}{a+c} - 1 \right)}$$

Максимальное значение осевой составляющей вектора напряженности магнитного поля при допущении, что $a \gg c$ равно ($x = 0$)

$$H_x = \frac{\delta}{4\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{ba}{(z-c)\sqrt{b^2 + a^2 + (z-c)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{ba}{(z+c)\sqrt{b^2 + a^2 + (z+c)^2}} \right] \quad (6)$$

Тогда согласно (1) магнитный поток в сердечнике ФД можно рассчитать по формуле

$$\Phi = \frac{1}{8\pi} \left(\frac{1}{b_k} + \frac{1}{b} \right) \int_V K(a, b, c, z) M_x dV,$$

$$\text{где } K(a, b, c, z) = \operatorname{arctg} \frac{ba}{(z-c)\sqrt{b^2 + a^2 + (z-c)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{ba}{(z+c)\sqrt{b^2 + a^2 + (z+c)^2}}. \quad (7)$$

Зависимость (7) имеет ту особенность, что при фиксированном значении z функция $K(a, b, c, z)$ имеет максимум при определенном значении b . Иными словами, при измерении поля от источника на известном расстоянии оптимальная длина сердечника модулятора должна выбираться в соответствии с зависимостью $K(a, b, c, z)$.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Яковенко В.В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986.–186с.
2. Стадник И.П., Горская И.Ю. Синтез магнитной системы с постоянными магнитами, создающей максимальное среднее значение поля на отрезке оси.// Электромеханика. – 1994. – №4-5. –с.16-21.
3. Калашникова О.Н., Криеренко А.Г. Расчет магнитного поля феррозонда металлоискателя.//Науковий вісник НГАУ, Дніпропетровськ – 2002.–№3.–с.64-65.