

УДК 620.179.143

## РАСЧЕТ ИНДУЦИРОВАННОГО ДЕФЕКТОМ МАГНИТНОГО ПОТОКА В СЕРДЕЧНИКАХ ФЕРРОЗОНДА

**В.В. Яковенко, Н.П. Корбан, С.Н. Швец**

*Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля, кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, 91034, тел. (8-0642) 41-71-20, e-mail: prilad@snu.edu.ua*

*Запропонований метод розрахунку магнітного потоку в осерді напівелементу феррозонду, який індукється полем щільного дефекту. Основою методу є принцип взаємності К.М. Поліванова. Магнітне поле осердя феррозонда з котушкою розраховується шляхом чисельного розв'язання інтегрального рівняння Фредгольма першого роду відносно щільності простого шару магнітних зарядів. Приведені результати чисельного експерименту щодо розрахунку магнітного потоку в осерді напівелементу феррозонда при різних геометричних параметрах дефекта і феррозонда.*

*The method of calculation of magnetic stream induced by the field crack defect in the core of ferroprobe semielement is offered. Principle of reciprocity of K.M. Polivanova is basis of this method. The magnetic field of ferroprobe core with a coil is calculated by the numerical solution of integral equation by Fredholm of the first type relative to the density of magnetic charges simple layer. The results of numeral experiment by calculation of magnetic stream in the core of ferroprobe semielement at the different geometrical parameters of defect and ferroprobe are adduced.*

Большинство теоретических исследований магнитных систем феррозондовых дефектоскопов сводится к определению составляющих напряженности магнитного поля рассеяния дефектов. При этом устанавливают зависимость составляющих вектора напряженности поля дефекта от размеров дефекта, магнитных характеристик материала контролируемой детали и от величины и направления намагничивающего поля [1]. Считалось, что феррозонд измеряет напряженность магнитного поля «в точке», в редких случаях измерения неоднородного поля дефекта усреднялись по длине сердечников феррозондов.

В то же время для разработчиков феррозондовых дефектоскопов важной информацией является не величина поля рассеяния дефекта, а магнитный поток, индуцированный дефектом в сердечниках феррозонда и его зависимость от параметров сердечников и расположенных на них катушек. Это дает возможность обосновано выбрать размеры сердечников и рассчитать коэффициент передачи магнитоизмерительного тракта.

В статье предлагается новый подход к расчету магнитного поля, индуцированного щелевым поверхностным дефектом ферромагнитной детали, который основан на теореме взаимности К.М. Поливанова [2].

Математическая модель формирования магнитного потока в сердечниках феррозонда индуцированного дефектом является следующей.

Рассматривается геометрическая модель системы феррозонд – дефект, содержащая ферромагнитную деталь с дефектом, имеющим такие параметры:  $2c_1$  – ширина раскрытия,  $2b_1$  – глубина дефекта,  $2a_1$  – длина дефекта и полуэлемент феррозонда расположенный или вертикально (рис. 1, а), или горизонтально (рис. 1, б) относительно поверхности контролируемой детали. Геометрические параметры сердечников полуэлементов феррозонда –  $2a$ ,  $2b$ ,  $2c$ , катушек –  $2a_k$ ,  $2b_k$ ,  $2c_k$  (рис. 1). Полуэлементы феррозондов расположены на расстоянии  $t$  от поверхности контролируемой детали.

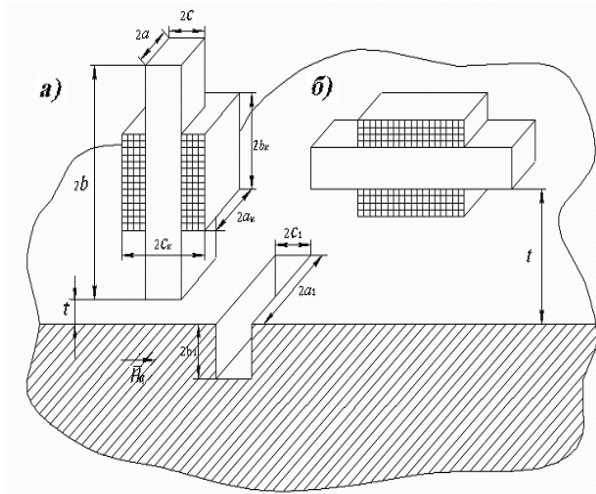


Рисунок 1 – Геометрическая модель системы феррозонд–дефект

Если магнитный поток в сердечниках полуэлементов  $\Phi$ , то напряженность магнитного поля  $H$  в них будет такой:

$$H = \frac{\Phi}{\mu_0 4ac\mu_c}, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu_c$  – относительная магнитная проницаемость сердечников, которая может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\mu_c = \frac{\mu m}{\mu + m - 1}; \quad (2)$$

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника;  $m$  – проницаемость формы сердечника.

При  $\mu \gg m$   $\mu_c \approx m$ .

В первом приближении проницаемость сердечника прямоугольного сечения определяется по формуле М.А. Розенблата [3]:

$$m = \frac{\pi(4b^2 - b_k^2)}{16ac \left( \ln \frac{7.2b}{2a+2c} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Принцип взаимности выражается соотношением [2]:

$$\Phi = \frac{\mu_0}{ikw} \int_V \bar{H} \bar{M} dV, \quad (4)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток в сердечнике, создаваемый расположенным вне сердечника намагниченным объемом  $V$ ;  $\bar{H}$  – напряженность

магнитного поля, созданного током катушки с сердечником феррозонда;  $w$  – число витков катушки;  $V$  – объем ферромагнитного тела с намагниченностью  $\bar{M}$ . Векторы  $\bar{H}$  и  $\bar{M}$  являются функциями координат.

Формула (4) преобразовывается следующим образом. Вводится функция скалярного магнитного потенциала, так чтобы  $\bar{H} = -grad \varphi$ .

Поскольку  $div \varphi \bar{M} = grad \varphi \bar{M} + \varphi div \bar{M}$ , а  $div \bar{M} = 0$  в объеме ферромагнитного тела, то при линейном намагничивании ферромагнетика в объеме  $V$  выражение (1) можно записать так:

$$\Phi = \frac{\mu_0}{ikw} \int_S \varphi M_n dS, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – магнитный потенциал, создаваемый катушкой в точках на поверхности  $S$  области дефекта;  $M_n$  – нормальная к поверхности ферромагнитного тела составляющая  $\bar{M}$ ;  $S$  – поверхность, охватывающая объем  $V$ .

Магнитный потенциал  $\varphi$ , создаваемый катушкой в точках на поверхности  $S$  области дефекта можно представить как сумму магнитных потенциалов, создаваемых обмоткой с током  $\varphi_k$  и слоем магнитных зарядов плотностью  $\sigma$  распределенных по всей поверхности сердечника.

Плотность магнитных зарядов на поверхности сердечника феррозонда определяется путем решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода

$$\oint_S \frac{\sigma}{|\bar{r}_Q - \bar{r}_P|} dS = 4\pi\mu_0 \varphi + 4\pi\mu_0 \varphi_k, \quad (6)$$

где  $P, Q$  – точки источника и наблюдения;  $\varphi_k$  – потенциал, создаваемый током в обмотке феррозонда.

При численном решении методом квадратур уравнение (6) сводится к системе линейных уравнений [4]:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sigma_i \frac{1}{|\bar{r}_i - \bar{r}_j|} \Delta S_i + \sigma_j \int_{\Delta S_j} \frac{1}{|\bar{r}_j|} \Delta S_j = 4\pi\mu_0 \varphi_j + 4\pi\mu_0 \varphi_{kj}, \quad (7)$$

где  $i, j$  – точки источника и наблюдения;  $N$  – количество прямоугольных элементов, на которые разбивается поверхность сердечника феррозонда.

Интеграл в уравнении (7) может быть взят в аналитическом виде. Тогда

$$\int_{\Delta S_j} \frac{1}{|\vec{r}_{ij}|} \Delta S_i = \Delta a_i \cdot \operatorname{arcsch} \frac{\Delta b_i}{\Delta a_i} + \Delta b_i \cdot \operatorname{arcsch} \frac{\Delta a_i}{\Delta b_i},$$

где  $\Delta a_i$  и  $\Delta b_i$  – стороны элементарных площадок, на которые разбивается поверхность сердечника феррозонда.

Магнитный потенциал, создаваемый обмоткой с током, определяется по такой формуле [3]:

$$\varphi_k = \frac{i_k w}{4\pi 2b_k} \int_{-c_k}^{c_k} \int_{-a_k}^{a_k} \int_{-b_k}^{b_k} \frac{(y'-y)}{\left(\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2}\right)^3} dy' dx' dz', \quad (8)$$

где  $2a_k, 2b_k, 2c_k$  – размеры катушки;  $i_k, w$  – ток и число витков катушки.

После интегрирования по  $x', y'$  (5) сводится к такому выражению:

$$\begin{aligned} \varphi_k = & \frac{i_k w}{4\pi 2b_k} \left[ - \int_{-c_k}^{c_k} \ln \left| a_k - x + \sqrt{(x-a_k)^2 + (y-b_k)^2 + (z'-z)^2} \right| dz' + \right. \\ & + \int_{-c_k}^{c_k} \ln \left| -a_k - x + \sqrt{(x+a_k)^2 + (y-b_k)^2 + (z'-z)^2} \right| dz' + \\ & + \int_{-c_k}^{c_k} \ln \left| a_k - x + \sqrt{(x-a_k)^2 + (y+b_k)^2 + (z'-z)^2} \right| dz' - \\ & \left. - \int_{-c_k}^{c_k} \ln \left| -a_k - x + \sqrt{(x+a_k)^2 + (y+b_k)^2 + (z'-z)^2} \right| dz' \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

Результатом решения интегрального уравнения (6) являются значения плотности магнитных зарядов в центрах элементарных площадок, что дает возможность найти значения потенциала на плоскостях дефекта путем использования следующей формулы:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_{i=1}^N \sigma_i \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \Delta S_j + \varphi_k, \quad (10)$$

где  $\varphi$  – потенциал на вертикальных плоскостях дефекта;  $\varphi_k$  – потенциал, создаваемый обмоткой с током, который рассчитывается по формуле (9);  $\Delta S_j$  – площадь элементарной площадки дефекта.

В соответствии с (5) магнитный поток в сердечнике феррозонда вычисляется по формуле

$$\Phi = \frac{\mu_0}{i_k w} \left( \sum_{j=1}^{N1} M_j \varphi_{j1} \Delta S_j + \sum_{j=1}^{N1} M_j \varphi_{j2} \Delta S_j \right), \quad (11)$$

где  $M_j$  – намагниченность в центре элементарной прямоугольной площадки  $\Delta S_j$ , на которые разбивается поверхность дефекта;  $\varphi_{j1}, \varphi_{j2}$  – потенциалы на боковых стенках дефекта;  $\Delta S_j$  – площадь элементарной площадки;  $N1$  – количество элементарных площадок дефекта на одной стенке.

Коэффициент передачи для второй гармоники феррозонда определяется по формуле [5]:

$$G_2 = \frac{8}{\pi} \omega S w_2 \mu_0 m, \quad (12)$$

где  $\omega$  – частота возбуждения феррозонда;  $S$  – площадь сечения сердечника ( $S = 4ac$ );  $w_2$  – число витков выходной обмотки.

Амплитуда напряженности поля выбирается оптимальной [5] и равной  $H_m = \sqrt{2} H_s$ , где  $H_s$  – напряженность магнитного поля насыщения сердечника.

Таким образом устанавливается функциональная зависимость между параметрами дефекта, параметрами феррозонда, магнитной характеристикой контролируемого материала, величиной намагничивания и амплитудой второй гармоники выходного сигнала феррозонда.

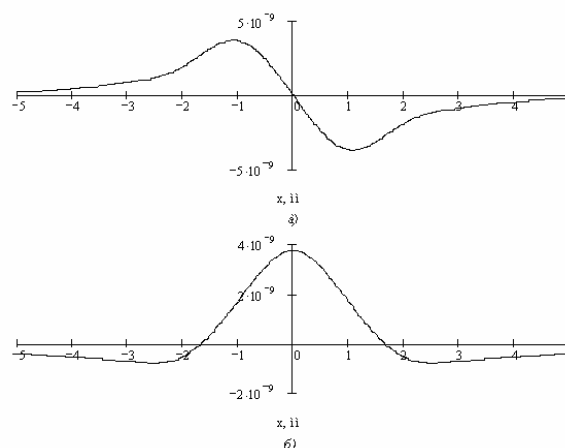
Численный эксперимент по определению магнитного потока в сердечнике полуэлемента феррозонда, индуцированного намагниченным дефектом в виде щели, проводился при следующих параметрах полуэлемента, дефекта и намагничивающего поля:  $2a = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $2b = (2 - 10) \cdot 10^{-3}$  м;  $2c = 1 \cdot 10^{-3}$  м;  $t = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м (для вертикального расположения полуэлемента);  $2a_k = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $2b_k = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $2c_k = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $2a_1 = (1 - 10) \cdot 10^{-3}$  м;  $2b_1 = (0,1 - 0,5) \cdot 10^{-3}$  м;  $2c_1 = (0,1 - 0,3) \cdot 10^{-3}$  м;  $H_0 = 10^5$  А/м.

Путем перемещения феррозонда относительно дефекта находилось максимальное значение магнитного потока в сердечнике полуэлемента и определялась зависимость этого максимального значения от геометрических параметров сердечника феррозонда и дефекта.

Результаты численных экспериментов приведены в виде графиков на рис. 2. На

рис. 2, *а* показана зависимость магнитного потока в сердечнике феррозонда от координаты перемещения  $x$ . Графики указывают на то, что при переходе через центр дефекта магнитный поток меняет полярность. На рис. 2, *б* показана та же зависимость для горизонтально расположенного сердечника, при этом магнитный поток в центре дефекта имеет максимальное значение, которое меньше, чем при вертикальном расположении сердечника. Из графиков, показанных на рис. 3, видно, что магнитный поток в сердечнике феррозонда, индуцированный дефектом, в значительной мере зависит от длины сердечника, особенно при малом раскрытии трещины. Увеличение длины сердечника от 2 мм до 3 мм уменьшает величину потока на 42%. С увеличением ширины и глубины дефекта магнитный поток в сердечнике увеличивается линейно, что подтверждается данными натуральных экспериментов, приведенных в [1].

Предложенный метод расчета магнитного потока в сердечнике полуэлемента феррозонда, индуцированного магнитным полем дефекта и основанный на теореме взаимности, в отличие от известных методов позволяет рассчитать магнитный поток с учетом не только параметров дефекта, но и геометрических параметров сердечника и катушки полуэлемента феррозонда. Расчет показывает, что длина сердечника в значительной мере влияет на величину магнитного потока в сердечнике. При ширине дефекта 0,1–0,3 мм длина сердечника феррозонда не должна превышать 2 мм, что подтверждает практика феррозондовой дефектоскопии [1].



*а* – для вертикального расположения сердечников; *б* – для горизонтального расположения сердечников

**Рисунок 2 – Зависимость магнитного потока в сердечнике от координаты  $x$**

#### Література

1. Зацетин Н.М., Коржева Л.В. *Магнитная дефектоскопия*. – М.: Наука и техника, 1981. – 208 с.
2. Поливанов К.М. *Теоретические основы электротехники, Ч.3.*–М.: Энергия, 1979.–32с.
3. Розенблат М.А. *Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники.*–М.: Наука, 1966.–547 с.
4. Mayer D., Olrych B. *Reseni rouinych a prostorovych stacionarnych elektrych amagneticrych poli Elektrotechn. obzor.*– 1980. – Cis. 8.– S. 456-463.
5. Афанасьев Ю.В. *Феррозонды.*–Л.: Энергия. 1969. – 166 с.