

Математическое моделирование магнитной системы концентратора поля

В. В. ЯКОВЕНКО, В. В. БУКРЕЕВ, И. А. БЕРЁЗКИНА

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля

В статье предложена математическая модель магнитной системы ферромодуляционного преобразователя, в магнитную систему которого входит концентратор магнитного поля. В воздушном зазоре концентратора располагается феррозонд с кольцевым сердечником. Математическая модель основана на численном решении системы интегральных уравнений. Получены числовые данные о степени увеличения коэффициента преобразования магниточувствительного измерителя поля за счёт использования концентратора.

У статті запропоновано математичну модель магнітної системи ферромодуляційного перетворювача, в магнітну систему якого входить концентратор магнітного поля. У повітряний проміжок концентратора розташовується феррозонд з кільцевою серцевинною. Математична модель заснована на цифровому вирішенні системи інтегральних рівнянь. Отримано числові дані про ступінь збільшення коефіцієнта перетворення магніточутливого вимірювача поля за рахунок використання концентратора.

In article the mathematical model of magnetic system of the ferroprobe converter which magnetic system includes the concentrator of a magnetic field is offered. In an air gap of the concentrator settles down ferroprobe with the ring core. The mathematical model is based on the numerical decision of system of the integrated equations. Numerical data on degree of increase in factor of transformation of a magnetic sensible measuring instrument of a field at the expense of concentrator use are obtained.

Постановка проблемы. Среди металлодетекторов, контролирующих немагнитную среду на присутствие ферромагнитных тел (ФТ), перспективными являются магнитные устройства, функционирующие на принципе измерения параметров магнитного поля, индуцированного намагниченным ФТ. В качестве магниточувствительных измерительных преобразователей используются феррозонды со стержневыми или с кольцевыми сердечниками [1]. Феррозонды обладают низким порогом чувствительности ($10^{-4} - 10^{-3} A/i$), временной и температурной стабильностью параметров, малой потребляемой энергией. Для повышения коэффициента преобразования феррозонды с кольцевым сердечником помещают в воздушный зазор концентратора магнитного поля, изготовленного из феррита или из тонких, изолированных друг от друга ферромагнитных пластин. Степень увеличения коэффициента преобразования за счёт использования концентраторов магнитного поля, в основном, определяется экспериментальным путём. Отсутствие теоретических разработок, касающихся расчёта магнитных систем концентраторов затрудняет их проектирование и не даёт возможности обоснованного выбора геометрических параметров.

Целью работы является разработка математической модели магнитного поля, индуцированного намагниченным ФТ в воздушном зазоре концентратора, дающей возможность рассчитать коэффициент преобразования магнитного измерительного преобразователя.

Основная часть. Конструкция магнитного измерительного преобразователя с концентратором магнитного поля показана на рис. 1. Концентратор состоит из двух ферромагнитных стержней прямоугольного сечения, в воздушном зазоре которого размещается магниточувствительный элемент:

феррозонд с кольцевым сердечником или преобразователь Холла (на рис. не показаны).

Согласно теореме о взаимности [2], магнитный поток, индуцированный ФТ в сердечнике концентратора, будет равен:

$$\Phi = \frac{\mu_0}{iw} \int_{V_{\Phi 0}} \vec{H} \cdot \vec{M} dV \quad (1)$$

где \vec{M} - вектор намагниченности в области $V_{\Phi T}$; \vec{H} - напряжённость магнитного поля, создаваемая сердечниками концентратора с расположенными на них обмотками с током; iw - ампер-витки обмотки расположенной на сердечниках концентратора.

Расчёт напряжённости магнитного поля, создаваемого сердечниками концентратора с обмотками производится путём численного решения интегрального уравнения [3], в области ферромагнитного сердечника:

$$\frac{1}{\chi} \vec{M} = \frac{1}{4\pi} \left[\int_V \frac{div \vec{M} \vec{1}_R}{R^2} dv - \int_S \frac{(\vec{M} \cdot \vec{1}_R)}{R^2} \right] + \vec{H}_k \quad (2)$$

где \vec{M} - вектор намагниченности; R - расстояние между точкой наблюдения и точкой источника; \vec{H}_k - вектор напряжённости магнитного поля, создаваемого катушкой с током; V, S - объём и площадь поверхности сердечников концентраторов; χ - магнитная восприимчивость ферромагнитного материала.

Объём сердечников концентраторов разбивается на элементарные объёмы (ЭО), представляющие собой параллелепипеды (рис. 2). В пределах каждого ЭО $div \vec{M} = 0$, поэтому (2) редуцируется к системе линейных алгебраических уравнений [4].

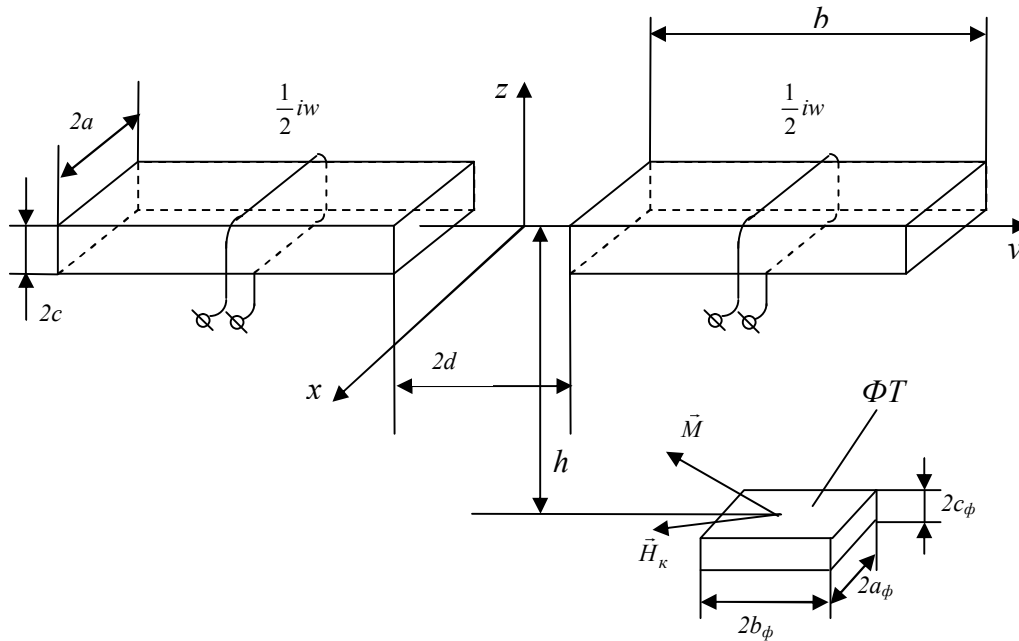


Рис. 1. Упрощённая конструкция концентраторов магнитного поля.

$$\frac{1}{\chi} \bar{M}_i = L_{ji} \bar{M}_j + \bar{H}_k, \quad (3)$$

где $L_{ji} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^6 \bar{I}_{nj k} \int_{S_{jk}} \frac{\bar{I}_{Rji}}{R_{ji}^2} dS_{jk}$.

Величина напряжённости поля, создаваемого катушкой прямоугольного сечения, находится по формуле Био-Савара:

$$\bar{H} = \frac{\delta}{4\pi} \left[\iint_{S_1} \frac{-\bar{I}_x \times \bar{r}}{r^3} dx dy + \iint_{S_2} \frac{\bar{I}_x \times \bar{r}}{r^3} dx dy + \iint_{S_3} \frac{\bar{I}_z \times \bar{r}}{r^3} dz dy + \iint_{S_4} \frac{-\bar{I}_z \times \bar{r}}{r^3} dz dy \right]$$

где δ - линейная плотность тока катушек, S_1, S_2, S_3, S_4 - площади поверхности слоёв катушек.

В развёрнутом виде система уравнений (3) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\chi} M_{xi} &= \sum_{j=1}^N C_{xx} M_{xj} + \sum_{j=1}^N C_{xy} M_{yj} + \sum_{j=1}^N C_{xz} M_{zj} + H_{kix}; \\ \frac{1}{\chi} M_{yi} &= \sum_{j=1}^N C_{yx} M_{xj} + \sum_{j=1}^N C_{yy} M_{yj} + \sum_{j=1}^N C_{yz} M_{zj} + H_{kiy}; \\ \frac{1}{\chi} M_{zi} &= \sum_{j=1}^N C_{zx} M_{xj} + \sum_{j=1}^N C_{zy} M_{yj} + \sum_{j=1}^N C_{zz} M_{zj} + H_{kiz}. \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты C системы уравнений (4) имеют аналитическое выражение:

$$C_{xx} = \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{(z_j - z_i + z)(y_j - y_i + y)}{(x_j - x_i + x)R} \left| \begin{matrix} \square x & \square y & \square z \\ -\square x & -\square y & -\square z \end{matrix} \right|;$$

$$C_{yy} = \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{(z_j - z_i + z)(x_j - x_i + x)}{(y_j - y_i + y)R} \left| \begin{matrix} \square x & \square y & \square z \\ -\square x & -\square y & -\square z \end{matrix} \right|;$$

$$C_{zz} = \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{(x_j - x_i + x)(y_j - y_i + y)}{(z_j - z_i + z)R} \left| \begin{matrix} \square x & \square y & \square z \\ -\square x & -\square y & -\square z \end{matrix} \right|;$$

$$C_{xy} = C_{yx} = \frac{1}{8\pi} \ln \left| \frac{z_j - z_i + z + R}{z_j - z_i + z - R} \right| \left| \begin{matrix} \square x & \square y & \square z \\ -\square x & -\square y & -\square z \end{matrix} \right|;$$

$$C_{xz} = C_{zx} = \frac{1}{8\pi} \ln \left| \frac{y_j - y_i + y + R}{y_j - y_i + y - R} \right| \left| \begin{matrix} \square x & \square y & \square z \\ -\square x & -\square y & -\square z \end{matrix} \right|;$$

$$C_{yz} = C_{zy} = \frac{1}{8\pi} \ln \left| \frac{x_j - x_i + x + R}{x_j - x_i + x - R} \right| \left| \begin{matrix} \square x & \square y & \square z \\ -\square x & -\square y & -\square z \end{matrix} \right|;$$

$$R = \sqrt{(x_j - x_i + \square x)^2 + (y_j - y_i + \square y)^2 + (z_j - z_i + \square z)^2}. \quad (5)$$

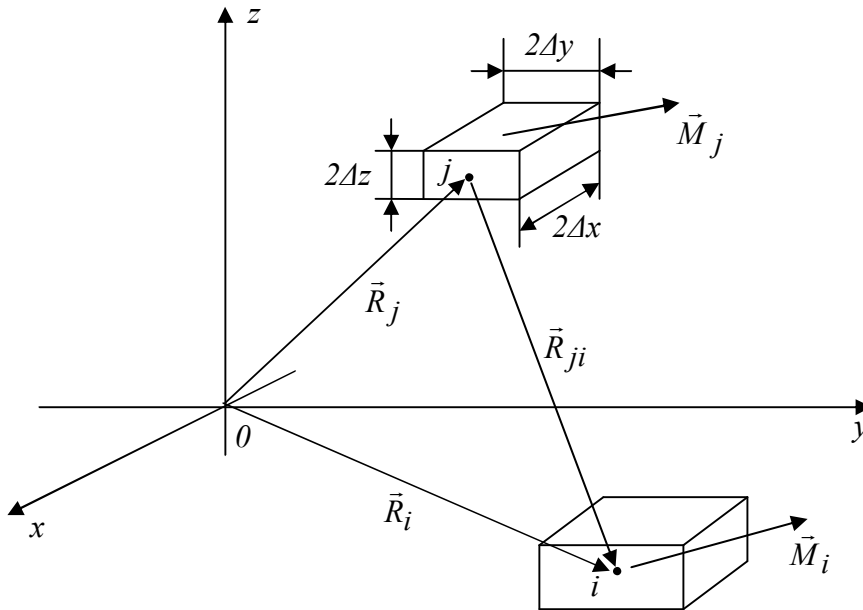


Рис. 2. К численному решению интегрального уравнения (2).

Поскольку концентратор магнитного поля состоит из двух сердечников, то система уравнений (3) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\chi} \bar{M}_i &= L_{ji} \bar{M}_j + L_{si} \bar{M}_s + \bar{H}_{k1} + \bar{H}_{k2} \\ \frac{1}{\chi} \bar{M}_j &= L_{ji} \bar{M}_j + L_{sj} \bar{M}_s + \bar{H}_{k1} + \bar{H}_{k2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\bar{H}_{k1}, \bar{H}_{k2}$ - векторы напряжённости поля, создаваемого катушками с током.

В результате решения (6) определяются составляющие вектора намагниченности \bar{M} в каждом ЭО.

Величина напряжённости поля, создаваемого двумя сердечниками с обмотками iW , рассчитывается по следующей формуле:

$$\bar{H} = L_{ji} \bar{M}_j + L_{st} \bar{M}_s + \bar{H}_{k1} + \bar{H}_{k2} \quad (7)$$

Объём ФТ также разбивается на ЭО и величина магнитного потока в сердечниках концентратора рассчитывается по приближённой формуле:

$$\Phi = \frac{\mu_0}{iW} \sum_{f=1}^F \bar{H}_f \cdot \bar{M}_f \square \Phi_{\Delta \delta}, \quad (8)$$

где F - количество ЭО, на которые разбивается объём ФТ.

Напряжённость магнитного поля в воздушном зазоре концентратора рассчитывается исходя из следующей зависимости:

$$H \approx \frac{\Phi}{\mu_0 4ac} \quad (9)$$

По предлагаемой методике определялась напряжённость магнитного поля в воздушном зазоре концентратора со следующими геометрическими параметрами:

$$2a = 0,015 i; \quad 2c = 0,01 i; \quad b = 0,1 i; \quad d = 0,01 i,$$

Размеры ФТ-

$$2a_{\Delta} = 0,005 i; \quad 2a_{\delta} = 0,01 i;$$

$$2\tilde{n}_{\delta} = 0,005 i; \quad \dot{i} = 10^3 \text{ A/i}.$$

Для оценки эффективности концентраторов магнитного поля был произведён расчёт напряжённости поля намагниченного ФТ на таком же расстоянии, но без концентратора по формуле:

$$\bar{H}_{\Delta} = L_{ji} \bar{M}_j \quad (10)$$

Результаты расчёта представлены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость величины H, H_{Δ} от расстояния h

| h, i | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,4 |
|---------------------------|------|-----|------|-----|------|-----|-----|
| $H, \text{ A/i}$ | 194 | 132 | 108 | 94 | 83 | 54 | 18 |
| $H_{\Delta}, \text{ A/i}$ | 118 | 72 | 68 | 59 | 41 | 26 | 7 |

Данные приведённые в таблице 1 свидетельствуют о том, что увеличение напряжённости информационного поля за счёт применения концентратора происходит в 1,64-2,5 раза.

Выводы

1. Разработана математическая модель формирования магнитного поля в воздушном зазоре концентратора поля, дающая возможность определить степень увеличения коэффициента преобразования магниточувствительного измерителя.

2. Использование концентратора магнитного поля увеличивает коэффициент преобразования магниточувствительного измерителя напряжённости в 1,6 – 2,5 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы / Ю. В. Афанасьев. — Л. : Энергоатомиздат, 1986. — 186 с.
2. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. Т. 3. / К. М. Поливанов. — М. : Энергия, 1972. — 299 с.
3. Курбатов П. А. Численный расчёт электромагнитных полей / П. А. Курбатов, С. А. Аринчин. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 167 с.
4. Букреев В. В. Метод расчёта быстродействия подвесных железотделителей / В. В. Букреев // Вісник Кременчуцького університету ім. М.Остроградського. — 2009. — № 3(56). — С. 99—102.

пост.03.10.12.