

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Л. О. КАРАХАНИЯ

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПОТЕРЬ В МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКЕ В СИНУСОИДАЛЬНОМ ПОЛЕ

Исследование электромагнитных свойств неоднородных материалов имеет важное теоретическое и практическое значение в связи с широким применением магнитодиэлектриков в радиоэлектронике, а также в связи с решением различных задач магнитной сепарации и разведки руд. При этом возникает задача определения эффективной (средней) магнитной проницаемости и характеристик неоднородного материала на основании данных о составе и физических свойствах его компонентов. Иногда возникает и обратная задача — определение проницаемости вещества данного компонента по результатам измерения среднего значения проницаемости неоднородной среды.

Решению указанных задач посвящено много исследований [1—4]. Однако в них не учитываются мультипольные взаимодействия высоких порядков между частицами. При больших концентрациях ферромагнитных включений необходимо учесть все мультипольные взаимодействия между частицами.

В настоящей заметке рассматривается расчет эффективной магнитной проницаемости и магнитных потерь неоднородной системы, состоящей из ферромагнитных включений сферической формы радиуса a и связующего вещества — диэлектрика. Ферромагнитные включения с объемной концентрацией p расположены в узлах кубической решетки (рис. 1). Вещество ферромагнитных включений обладает потерями на гистерезис и характеризуется комплексной магнитной проницаемостью

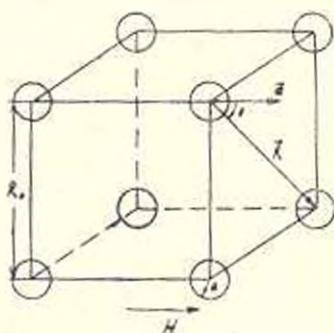


Рис. 1

$\mu_1 = \mu'_1 - j\mu''_1 = \mu_1 e^{-j\delta}$ и удельной электрической проводимостью σ .

Пусть в исследуемой неоднородной системе действует переменное однородное магнитное поле

$$H(t) = H_m \sin(\omega t + \psi_0). \quad (1)$$

Будем считать, что напряженность поля во включениях такая, что для вещества ферромагнитных включений зависимость $B=f(H)$ можно считать прямолинейной.

Следовательно, действительная (μ_1') и мнимая (μ_1'') части комплексной проницаемости вещества феррочастиц постоянны (не зависят от напряженности поля).

Для определения эффективной проницаемости неоднородной среды воспользуемся известной аналогией расчета электростатических и магнитостатических полей. Гюнтер и Гейрих [5] на основании мультипольной теории получили выражение диэлектрической проницаемости смеси в функции от диэлектрических проницаемостей включений, связующей среды и концентрации включений для случая постоянного поля.

Заменяя в выражении средней диэлектрической проницаемости, полученном в работе [5], ϵ_1 и ϵ_2 магнитными проницаемостями связующего вещества (μ_0) и ферромагнитных включений (μ_1), получим формулу статической магнитной проницаемости смеси

$$\bar{\mu}_{cp} = \mu_0 \frac{3 + 2(\mu_0/\mu_1 - 1)(1 - p) - \gamma}{3 + (\mu_0/\mu_1 - 1)(2 + p) - \gamma} \quad (2)$$

с учетом мультипольного взаимодействия.

При пренебрежении мультипольными моментами высокого порядка (т. е. при учете только дипольных моментов) $\gamma = 0$ и получается результат, полученный в [6].

Распространим расчет эффективной проницаемости по мультипольной теории на случай синусоидального внешнего поля. В этом случае необходимо учесть влияние вихревых токов и ферромагнитных включений. Для этого пользуемся понятием эквивалентной магнитной проницаемости одиночного шара (включения), учитывающей поверхностный эффект [7]:

$$\bar{\mu}_{\text{шар}} = \frac{2\mu_1(\theta - \text{th } \theta)}{\theta^2 \text{th } \theta - (\theta - \text{th } \theta)}, \quad (3)$$

где $\theta = a \sqrt{j\omega\mu_1\sigma}$; μ_1 — комплексная магнитная проницаемость вещества ферромагнитного включения, т. е. значение магнитной проницаемости на поверхности, учитывающей только явление гистерезиса. В первом приближении в качестве модуля μ_1 можно взять значение магнитной проницаемости по основной кривой намагничивания при $H = H_m/\sqrt{2}$ [8].

Подставляя в (3) вместо μ_1 эквивалентную проницаемость $\bar{\mu}_{\text{шар}}$ включения, получим выражение эффективной комплексной проницаемости неоднородной среды в синусоидальном поле:

$$\bar{\mu}_{cp} = \mu_0 \frac{3 + 2(\mu_0/\bar{\mu}_{\text{шар}} - 1)(1 - p) - \gamma}{3 + (\mu_0/\bar{\mu}_{\text{шар}} - 1)(2 + p) - \gamma}, \quad (4)$$

где

$$\bar{\gamma} = \frac{48 \frac{(\mu_0/\mu_{\text{вкл}}-1)^2}{7+4(\mu_0/\mu_{\text{вкл}}-1)} \left(\frac{a}{R_0}\right)^{10} \left| \sum_{R \neq 0} \frac{P_2(\vec{e}\vec{R}/R)}{(R/R_0)^5} \right|^2}{1 + 60 \frac{\mu_0/\mu_{\text{вкл}}-1}{7+4(\mu_0/\mu_{\text{вкл}}-1)} \left(\frac{a}{R_0}\right)^2 \sum_{R \neq 0} \frac{P_0(\vec{e}\vec{R}/R)}{(R/R_0)^3}}$$

\vec{e} — единичный вектор в направлении внешнего поля;

\vec{R} — решеточный вектор;

R_0 — расстояние между ближайшими включениями в решетке.

В полученном выражении эффективной комплексной проницаемости учитывается влияние концентрации, магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости и радиуса ферромагнитных включений, а также частоты внешнего синусоидального поля (в диапазоне $5 \cdot 10^2 - 10^6$ Гц) на величину эффективной проницаемости.

С целью расчета потерь в магнитодиэлектрике определим магнитный момент ферромагнитных включений. Магнитный момент (средний дипольный момент) включения с учетом мультипольных взаимодействий до третьего порядка включительно, по аналогии с [6], равен:

$$\vec{M} = 4\pi a^3 \frac{\mu_{\text{вкл}} - \mu_0}{\mu_{\text{вкл}}(1 - p - \gamma) + \mu_0(2 + p)} \quad (5)$$

Поглощаемую ферромагнитным включением мощность можно выразить через магнитный момент включения [9]

$$W_1 = -\frac{1}{2} H_m^0 \text{Im} \vec{M}. \quad (6)$$

Потери мощности в единице объема магнитодиэлектрика равны

$$\dot{W} = n W_1 = -\frac{n}{2} H_m^0 \text{Im} \vec{M}, \quad (7)$$

где $n = \frac{3\rho}{4\pi a^3}$ — число ферромагнитных включений в единице объема.

Выводы

1. Показано, что метод расчета средней магнитной проницаемости по мультипольной теории можно распространить на случай синусоидального поля, заменяя комплексную проницаемость вещества ферромагнитных включений эквивалентной проницаемостью шара, которой учитывается поверхностный эффект в каждом отдельном включении.

2. Получены выражения для магнитного момента включения, находящегося в неоднородной среде с эффективной проницаемостью $\mu_{\text{эф}}$ при учете влияния всех намагниченных включений и поглощаемой мощности.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 11 III.1974.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ondorff F.* Arch. Elektrotechnik, 25, 436 (1931).
2. *Кондорский Е. И.* «Известия АН СССР, серия физическая», 16, 449 (1952).
3. *Фрадкин Б. М.* «Известия АН СССР, серия физическая», 19, 481 (1952).
4. *Doebke W.* Ferromagnetische Mäxskörper Zs. f. techn. Physik, 1930, т. 11, стр. 12.
5. *Ganter R. und Heinrich D.* Zs. f. Physik, 1965, В. 185.
6. *Кирапетян М. А., Караханян Л. О.* Расчет магнитной проницаемости магнитодиэлектриков с эллипсоидальными феррочастицами. Научные труды Ереванского политехнического института им. К. Маркса, том 36, вып. IV, серия технической кибернетики (1972).
7. *Катков Н. Г., Поливанов К. М.* «Известия АН СССР, серия физическая», 18, 419, (1954).
8. *Нейман Л. Р.* Поверхностный эффект в ферромагнитных телах, 1949.
9. *Фрадкин Б. М.* Сборник трудов МЭИ, 1953, вып. 14.