

УДК 620.179.143

РАБОТА ФЕРРОЗОНДОВ В РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С.Н. Швец, В.В. Яковенко, В.В. Мирошников, Т.В. Победа

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

Обґрунтована необхідність і можливість використання ферозондів для контролю під поверхневих дефектів у змінному магнітному полі. Показано, що для реєстрації підповерхневих дефектів на глибині 5 – 7 мм необхідно мати магніточутливий елемент з чутливістю 0,2 – 0,5 А/м.

Обоснована необходимость и возможность использования феррозондов для контроля под поверхностных дефектов в переменном магнитном поле. Показано, что для регистрации подповерхностных дефектов на глубине 5 – 7 мм необходимо иметь магниточувствительный элемент с чувствительностью 0,2 – 0,5 А/м.

It is grounded a necessity and possibility of ferroprobes using for control under superficial defects in the variable magnetic field. It is rotined that it is necessary to have a magnetic sensor with a sensitiveness 0,2 – 0,5 A/m for registration of subsuperficial defects on a depth 5 – 7 mm.

Электромагнитный метод выявления дефектов позволяет контролировать как ферромагнитные, так и неферромагнитные материалы. При этом он обладает высокой чувствительностью к поверхностным дефектам, которая существенно ослабевает с увеличением глубины залегания дефекта.

Используя классическую формулу определения глубины проникновения электромагнитной волны [1], рассчитаем ее для двух материалов: ферромагнитного и неферромагнитного – на различных частотах (табл. 1). При этом будем учитывать поправку, предложенную В.Н. Учаниным [2] при определении реальной глубины проникновения электромагнитной волны.

Из приведенных расчетных данных видно, что глубина проникновения электромагнитной волны для ферромагнитного материала на

частоте до 1 кГц составляет единицы миллиметров, а для неферромагнитного материала – доли миллиметра. Поэтому только на таких частотах имеет смысл контролировать подповерхностные дефекты. На этих же частотах плотность вихревых токов на глубине до 4 мм уменьшается по кубической зависимости, и реально зарегистрировать эти изменения вихретоковым преобразователем практически невозможно. При этом необходимо учитывать разрешающую способность вихретокового преобразователя, которая зависит от его геометрических размеров. Повышение разрешающей способности вихретокового преобразователя приводит к его миниатюризации, что ведет к уменьшению числа витков и, как следствие, к уменьшению чувствительности.

Таблица 1 – Значения расчетной и реальной глубины проникновения вихревых токов

Материал f , Гц	Сталь 10кп		Алюминий	
	$\delta_{\text{расч}}$, мм	$\delta_{\text{реал}}=2,8 \cdot \delta_{\text{расч}} \cdot \text{мм}$	$\delta_{\text{расч}}$, мм	$\delta_{\text{реал}}=2,8 \cdot \delta_{\text{расч}} \cdot \text{мм}$
100	1,6	4,5	0,276	0,773
1000	0,51	1,43	0,087	0,244
10000	0,16	0,45	0,027	0,077
100000	0,051	0,143	0,009	0,024
1000000	0,016	0,045	0,003	0,008

Следовательно, для выявления подповерхностных дефектов в переменных магнитных полях необходимо использовать другие электромагнитные преобразователи, обладающие большей по сравнению с вихретоковыми преобразователями чувствительностью на низких частотах.

Анализ магниточувствительных элементов однозначно позволяет сделать вывод о том, что феррозонд, успешно работающий в постоянных магнитных полях, может быть использован и для измерения низкочастотных переменных магнитных полей.

Основываясь на теории феррозондов, хорошо разработанной Янусом Р.И., Зацепиным Н.Н., Афанасьевым Ю.В., рассмотрим возможность работы двухсердечного феррозонда (рис. 1) в режиме измерения переменного магнитного поля, изменяющегося по синусоидальному закону $H_0 = H_{0m} \cdot \sin \omega t$.

Проведем расчет выходного сигнала феррозонда при следующих условиях:

– используется арктангенсная аппроксимация петли гистерезиса сердечника феррозонда:

$$B(H) = \frac{2B_s}{\pi} \arctg\left(\frac{\pi H}{2H_s}\right), \quad (1)$$

где B_s , H_s – индукция и напряженность насыщения сердечников феррозонда;

– не учитывается действие вихревых токов в сердечнике, поскольку они выполняются из ленты аморфного железа толщиной 25 мкм;

– обмотка возбуждения запитывается от источника тока;

– выходная обмотка имеет режим холостого хода;

– не учитываются межвитковые емкости.

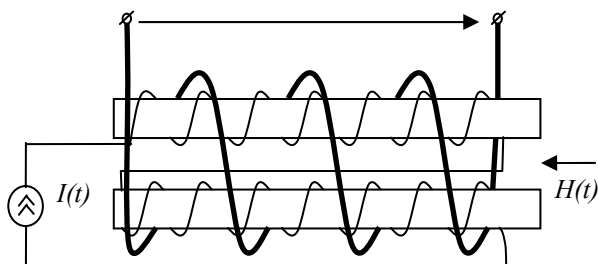


Рисунок 1 – Схема феррозонда

Эти допущения основаны на том, что в реальных устройствах параметры и условия работы ферромодуляционных измерительных преобразователей мало отличаются от идеализированных.

Функция индукции в сердечнике феррозонда раскладывается в ряд Тейлора при $H_0 \ll H$, где H_0 – величина напряженности измеряемого поля, H – напряженность поля возбуждения:

$$B_a(H) = H + \frac{dB}{dH}(H + H_0), \quad (2)$$

$$B_b(H) = H + \frac{dB}{dH}(H - H_0). \quad (3)$$

Вычитая равенства (2) и (3) получаем суммарную индукцию в двух сердечниках

$$B_a(H) - B_b(H) = 2 \frac{dB}{dH} H_0. \quad (4)$$

В выходной обмотке феррозонда получаем напряжение $u_2(t)$, которое равно:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= \frac{d\psi}{dt} = W_2 S \frac{d}{dt} [B_a(H) - B_b(H)] = \\ &= 2W_2 S \mu_0 \frac{d}{dt} \mu_d(H) H_0, \end{aligned}$$

где W_2 – число витков выходной обмотки; S – площадь поперечного сечения сердечника;

$\mu_d(H) = \frac{dB}{dH}$ – дифференциальная магнитная

проницаемость сердечника феррозонда.

С учетом (1) дифференциальная магнитная проницаемость сердечников будет равной:

$$\mu_d(H) = \frac{\mu_m}{1 + \left(\frac{\pi H_m}{2H_s}\right)^2 \sin^2 \omega t}, \quad (5)$$

здесь $\mu_m = \frac{B_s}{\mu_0 H_s}$ – значение магнитной

проницаемости сердечника в точке $H=0$, ω – частота возбуждения феррозонда.

Учитывая, что оптимальным значением амплитуды напряженности возбуждения является $H_m = \sqrt{2} H_s$ [3], (5) переписывается так:

$$\mu_d(H) = \frac{\mu_m}{1 + 5 \sin^2 \omega t} \quad (6)$$

Так как величина измеряемого поля равна $H_0 = H_{0m} \sin \omega_0 t$, то для выходного напряжения феррозонда можно записать таким образом:

$$u_2(t) = W_2 S \mu_0 \mu_m H_{0m} \frac{d \sin \omega_0 t}{dt} \frac{1}{1 + 5 \sin^2 \omega t} = W_2 S \mu_0 \mu_m H_{0m} \times \frac{1}{(1 + 5 \sin^2 \omega t)^2} [1,25(2\omega + \omega_0) \sin(2\omega + \omega_0)t + 1,25(2\omega - \omega_0) \sin(2\omega - \omega_0)t - 3,5\omega_0 \sin \omega_0 t] \quad (7)$$

Естественно, что при $\omega_0 = 0$ выражение (7) преобразуется в известное выражение функции преобразования при измерении постоянного поля:

$$u_2(t) = W_2 S \mu_0 \mu_m H_0 \frac{5 \sin 2\omega t}{(1 + 5 \sin^2 \omega t)^2},$$

где H_0 – напряженность измеряемого постоянного поля.

Согласно формулы (7) были выполнены расчеты при следующих параметрах феррозонда: $H_S = 1000$ (А/м), $B_S = 0,7$ (Тл), $S = 5 \cdot 10^{-8}$ м², $W_2 = 200$, $L = 10^{-2}$ м. Частота генератора $f_U = 10000$ Гц, $U_m = 1,42$ В, амплитуда измеряемого поля $H_{0m} = 100$ А/м.

Из спектров, приведенных на рис. 2 и рис. 3 видно, что при измеряемой частоте $f_0 = 1000$ Гц спектральные линии четных гармоник выходного напряжения начинают заметно раздваиваться. Причем амплитуды четных гармоник с ростом частоты измеряемого поля практически не изменяются. Смещение спектров четных гармоник выходного сигнала феррозонда происходит на величину f_0 до значений $f_0 = f$, где f – частота поля возбуждения. Амплитуда выходного сигнала начинает убывать после $f_0 > 0,8f$.

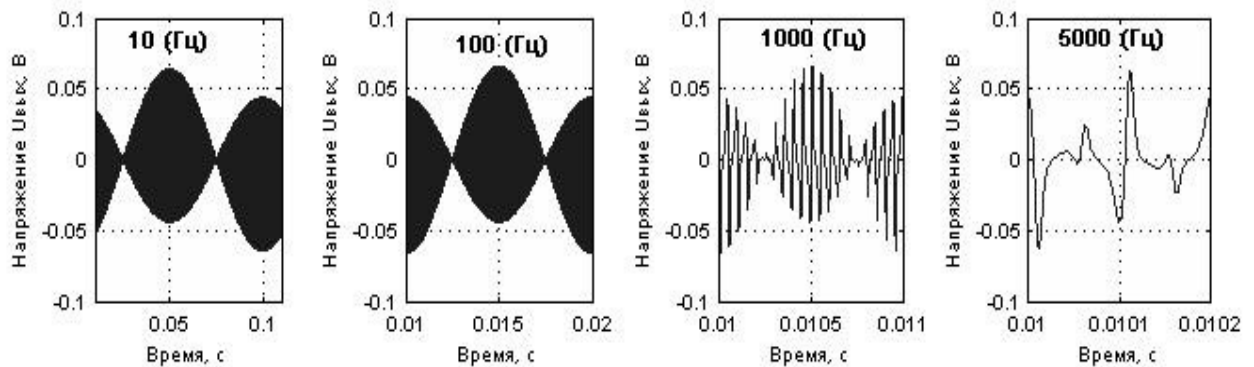


Рисунок 2 – Зависимость формы сигнала на выходе феррозонда от частоты измеряемого поля

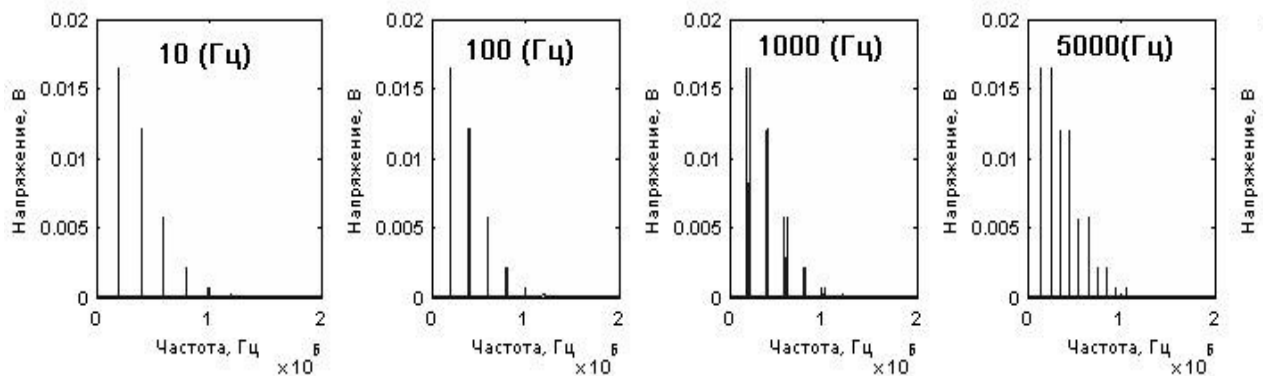


Рисунок 3 – Спектр сигнала на выходе феррозонда

ВЫВОДЫ

Вихретоковый метод контроля традиционно можно рассматривать как метод контроля поверхностных дефектов.

Для регистрации подповерхностных дефектов на глубине 5-7 мм в переменном магнитном поле необходимо иметь магниточувствительный элемент с порогом чувствительности 0,2-0,5 А/м. Данным порогом чувствительности обладает феррозонд, работающий на второй гармонике.

Порог чувствительности феррозонда слабо зависит от его геометрических размеров, поэтому феррозонд обладает высокой разрешающей способностью.

Дальнейшее развитие теории феррозондов в области переменных магнитных полей показывает, что их с успехом можно применять для дефектоскопии изделий в низкочастотных переменных магнитных полях.

Литература

1. Дорофеев А. Л., Любашев Г. А., Останин Ю. Я. Измерения толщины покрытий с помощью вихревых токов. – М., “Машиностроение”, 1975. – 64 с.
2. В.Н. Учанин. Развитие вихретоковых методов контроля: задачи, решения, перспективы // 5-а Національна науково-технічна конференція і виставка „Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. – Київ: УТ НКТД. – 2006. – С. 46-54.
3. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. – Л.: Энергия, 1969. – 168 с.

Рекомендована до друку Оргкомітетом 5-ої Міжнародної н/т конференції „Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазпромислового обладнання”, яка відбулася в ІФНТУНГ 02-05.12.2008р.