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	
	$\delta_{расч}$, мм	$\delta_{реал}=2,8\cdot\delta_{расч}$·мм	$\delta_{расч}$, мм	$\delta_{реал}=2,8\cdot\delta_{расч}$·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 двухстержневого феррозонда (рис. 1) в режиме измерения переменного магнитного поля, изменяющегося по синусоидальному закону $H_0=H_{0m}\cdot sin\ \omega_0 t$.

Проведем расчет выходного сигнала феррозонда при следующих условиях:

– используется арктангенсная аппроксимация петли гистерезиса сердечника феррозонда:

$$B(H)=\frac{2B_S}{\pi}arctg\left(\frac{\pi H}{2H_S}\right), \qquad (1)$$

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.

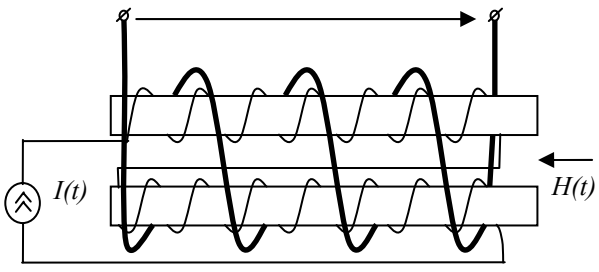


Рисунок 1 – Схема феррозонда

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 $H_0 << H$, где H_0 – величина напряженности измеряемого поля, H – напряженность поля возбуждения:

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

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

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

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

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

$$u_2(t)=\frac{d\psi}{dt}=W_2S\frac{d}{dt}\left[B_a(H)-B_b(H)\right]=$$

$$=2W_2S\mu_0\frac{d}{dt}\mu_Д(H)H_0,$$

где W_2 – число витков выходной обмотки; S – площадь поперечного сечения сердечника; $\mu_Д(H)=\frac{dB}{dH}$ – дифференциальная магнитная проницаемость сердечника феррозонда.

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

$$\mu_Д(H)=\frac{\mu_m}{1+\left(\frac{\pi H_m}{2H_S}\right)^2 sin^2\omega t}, \qquad (5)$$

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) перепишется так:

$$\mu_{Д}(H)=\frac{\mu_m}{1+5\sin^2\omega t}. \qquad (6)$$

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

$$u_2(t)=W_2S\mu_0\mu_m H_{0m}\frac{d}{dt}\frac{\sin\omega_0 t}{1+5\sin^2\omega t}=W_2S\mu_0\mu_m H_{0m}\times$$
$$\times\frac{1}{(1+5\sin^2\omega t)^2}\left[1{,}25(2\omega+\omega_0)\sin(2\omega+\omega_0)t+\right.$$
$$\left.+1{,}25(2\omega-\omega_0)\sin(2\omega-\omega_0)t-3{,}5\omega_0\sin\omega_0 t\right]. \qquad (7)$$

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

$$u_2(t)=W_2S\mu_0\mu_m H_0\frac{5\sin 2\omega t}{(1+5\sin^2\omega t)^2},$$

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), $S=5\cdot10^{-8}$ м^2, 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 $f_0>0{,}8f$.

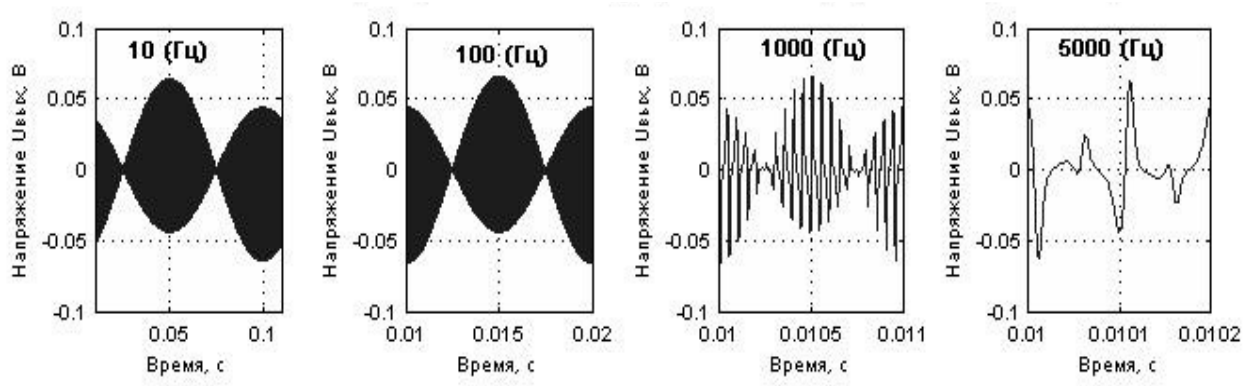


Рисунок 2 – Зависимость формы сигнала на выходе феррозонда от частоты измеряемого поля

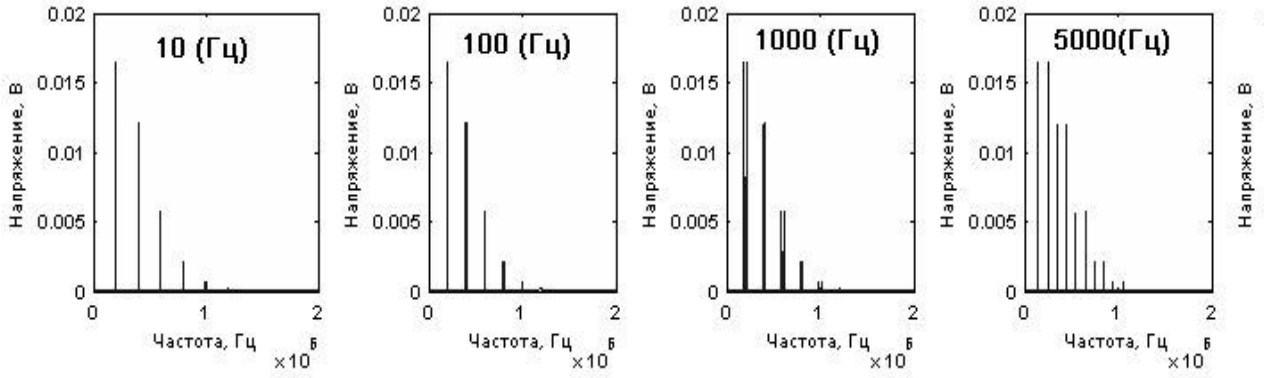


Рисунок 3 – Спектр сигнала на выходе феррозонда

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 нафтогазопромислового обладнання", яка відбулася в ІФНТУНГ 02–05.12.2008р.