

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СКАНЕР СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

© 2023 г. В.В. Мирошников^{1,*}, Н.В. Гречишкина^{2,**}

¹ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»,
Россия 291034 Луганск, кв. Молодежный, 20А
E-mail: *prorectormvv@mail.ru; **natalisha.grech@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023; после доработки 09.06.2023
Принята к публикации 09.06.2023

Предложен принцип построения электромагнитного сканера для непрерывного контроля действующего промышленного объекта, позволяющего в режиме реального времени контролировать динамику развития дефекта, что позволяет определить остаточный ресурс работы контролируемого объекта.

Ключевые слова: синтез магнитного поля, феррозонд, обмотка намагничивания, многоэлементный преобразователь, однородность магнитного поля, зона контроля, дефект.

ELECTROMAGNETIC SCANNER OF STRUCTURALLY HETEROGENEOUS MEDIA

© 2023 V.V. Miroshnikov^{1,*}, N.V. Grechishkina^{2,**}

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk Vladimir Dahl State University»,
Molodezhny sq., 20A, Lugansk, 291034, Luhansk People's Republic,
E-mail: *prorectormvv@mail.ru; **natalisha.grech@mail.ru

The principle of constructing an electromagnetic scanner for continuous monitoring of an operating industrial object is proposed, the principle monitoring the dynamics of defect development in real time, that allows determining the residual operating life of the monitored object.

Keywords: magnetic field synthesis, ferrosonde, magnetization winding, multi-element converter, magnetic field uniformity, control zone, defect.

DOI: 10.31857/S0130308223090087, EDN: FOOAIU

Контроль конструктивных элементов промышленных объектов, находящихся в эксплуатации, как правило, проводится при остановке их работы. Выявленный в процессе обследования дефект может быть не критичным для последующей эксплуатации объекта. Однако для точного понимания критичности выявленного дефекта на данную область устанавливается электромагнитный сканер, который в реальном времени сканирует контролируемую область с дефектом и передает информацию о топографии поля дефекта. Динамика изменения топографии поля рассеяния дефекта позволяет оценить скорость развития дефекта при действии рабочих нагрузок на область контроля, что и дает возможность определить время до критического изменения дефекта, после которого эксплуатация объекта не безопасна.

Конструктивно электромагнитный сканер содержит источник зондирующего электромагнитного поля, в качестве которого используется многосекционная катушка, в плоскости которой расположены феррозонды. С помощью катушки, поделенной на секции с отдельными источниками тока, синтезируется магнитное поле с заданной напряженностью и однородностью [1]. Задачу синтеза магнитного поля сформулируем так: в плоскости перпендикулярной оси катушки необходимо создать поле, вектор индукции которого $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}_0$ будет перпендикулярен этой плоскости.

К топографии зондирующего поля предъявляются следующие требования:

- поле концентрируется в зоне области контроля;
- вектор напряженности магнитного поля, совпадающий с плоскостью сердечника феррозонда, должен иметь минимальное значение в области расположения матрицы феррозондов.

Принцип построения сканера электромагнитного контроля показан на рис. 1.

В точке (a), где расположена матрица феррозондов, напряженность магнитного поля должна равняться нулю, а в точке (b) — иметь максимальное значение, так как точка (b) соответствует середине зоны контроля объекта. Синтез зондирующего поля проводим по методике предложенной в [2] с адаптацией, которая заключается в том, что размеры секций катушек изменяются в процессе синтеза.

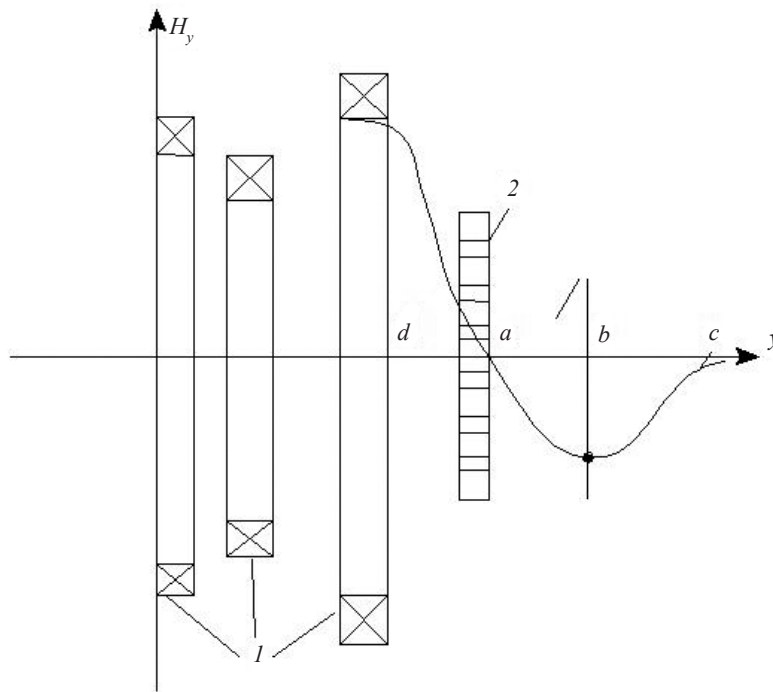


Рис. 1. Распределение y -составляющей вектора напряженности магнитного поля электромагнитного сканера: 1 — секции зондирующих катушек; 2 — матрица феррозондов.

Катушки зондирующей магнитной системы представляют собой N тонких секций. Катушки прямоугольной формы. Толщина секций и расстояние между ними могут быть неодинаковыми в ходе проведения синтеза магнитного поля, искомым является число витков в тонких секциях, направления и плотность тока в этих секциях. Используя формулу Био—Савара—Лапласа, находим напряженность поля при заданном токе.

Феррозонд является магниточувствительным элементом, позволяющим регистрировать постоянные и переменные магнитные поля, теория которых в настоящее время достаточно полно разработана. Однако некоторые вопросы требуют дополнительного решения из-за матричного принципа их расположения. Одной из проблем является близкое расположение полуэлементов, которое приводит к их взаимному влиянию и, в результате, к снижению чувствительности феррозондов.

Максимальное расстояние между полуэлементами в сканере определяется теоремой Котельникова [3]. При ширине спектра $\Delta\alpha$ намагниченного участка расстояние, при котором не происходит потеря информации, будет равно:

$$\Delta X_m = \frac{\pi}{2\alpha_B},$$

где α_B — высшая частота спектра функции $H(x)$.

Спектральная функция Фурье для нормальной составляющей напряженности поля будет равна

$$X(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} H_y(x) e^{-j\alpha x} dx, \text{ а с учетом ее четности: } X(\alpha) = 2 \int_0^{\infty} H_y(x) \cos(\alpha x) dx.$$

Приближенно зависимость для $X(\alpha)$ имеет вид:

$$X(\alpha) = H_m \frac{\pi/a}{(\pi/a)^2 - \alpha^2} \cos \alpha a,$$

где $2a$ — длина положительного значения вертикальной составляющей напряженности поля.

Для электромагнитного сканера расстояние между полуэлементами феррозонда не должно превышать 8,7 мм, что приемлемо для конструкции стержневого феррозонда.

В первом приближении порог чувствительности феррозонда, работающего в режиме градиентометра, определяется, исходя из описания составляющей вектора напряженности поля рассеяния [4]:

$$H(x) \frac{H_0}{1 + \beta^2 x^2},$$

где H_0 — максимальное значение напряженности поля; β — определяется из условия, что на расстоянии ΔX_m напряженность равна αH_0 при $0 < \alpha < 1$.

Тогда $\beta = \frac{1}{x_0} \sqrt{\frac{1-\alpha}{\alpha}}$, при этом измеряемое феррозондом поле:

$$H_n(x, \Delta x) = H_0 \beta^2 \frac{2x\Delta x + \Delta x^2}{(1 + \beta^2 x^2)(1 + \beta^2 (x + \Delta x)^2)}.$$

Наибольшее значение $H_n(x)$ находится в области, где скорость изменения функции $H(x)$ максимальна [5]:

$$\frac{dH(x)}{dx} = -\frac{2x\beta^2}{(1 + \beta^2 x^2)^2}.$$

На расстоянии Δx напряженность поля уменьшится на коэффициент $k = \frac{H_m(\Delta x)}{H_0}$, что позволяет определить порог чувствительности феррозонда, который находится в пределах 1—3 А/м. Такой порог чувствительности обеспечивается синусоидальным током возбуждения при длине сердечника 4—7 мм и при наличии обмотки компенсации низкочастотных магнитных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *By M. Edwards*. Detecting Foreign Bodies in Food. Published 2004 Woodhead Publishing. 306 p. SBN 1855737299.
2. *Стадник И.П.* Метод последовательных приближений для линейных интегральных уравнений первого рода и его применения к решению задач синтеза магнитных полей. Ч.2 // *Электромеханика*. 1981. № 7. С. 721—728.
3. *Поливанов К.М.* Теоретические основы электротехники. Часть 3. М.: Энергия, 1974. 282 с.
4. *Розенблат М.А.* Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1966. 542 с.
5. *Романенко А.В., Яковенко В.В., Мирошников В.В.* Розрахунок магнітної проникності осередь ферозондів при їх взаємному впливі // *Методи та прилади контролю якості*. 2000. № 6. С. 6—8.