

## ПОВЫШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ВИБРОИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Николаев Ю.Л.\* , Чернова А.В.\*\*

*Московский государственный университет приборостроения и информатики,  
МГУПИ, ул. Стромынка, 20, Москва, 107996, Россия*

*\* e-mail: leila\_nik@list.ru*

*\*\* e-mail: aleks.chernova@gmail.com*

---

Рассмотрен метод магнитного контроля, основанный на вибросканировании топографии магнитного поля рассеяния дефекта с помощью индукционного преобразователя и определении характеристического размера и местоположения дефекта по форме и параметрам индуцированного сигнала. Получены аналитические соотношения для определения параметров виброперемещения индукционного преобразователя, обеспечивающих высокую селективную чувствительность. Приведены экспериментальные результаты по оценке относительной чувствительности и локальности определения местоположения дефекта.

*Ключевые слова:* магнитный контроль, индукционный преобразователь, вибросканирование, индуцированная ЭДС, селективная чувствительность, локальность.

---

Одной из основных проблем магнитного контроля является обеспечение высокой селективности выявления дефектов. Метод контроля должен обладать высокой чувствительностью к магнитным полям рассеяния дефекта и быть инвариантным по отношению к внешним магнитным полям, возникающим из-за воздействия различных факторов, главным образом в результате рассеяния намагничивающего поля.

Эффективным приемом повышения селективности магнитного контроля является применение градиентометрических методов регистрации магнитных полей в процессе сканирования поверхности объектов [1]. Градиентометрические преобразователи реагируют на резкое возрастание и убывание напряженности магнитного поля, свойственное для топографии магнитных полей рассеяния дефекта, и малочувствительны к плавно изменяющимся магнитным полям над бездефектными участками поверхности контролируемого объекта.

В качестве первичного градиентометрического преобразователя наиболее целесообразно применение индукционного преобразователя, чувствительность которого зависит от скорости изменения магнитного потока, сцепленного с витками его индуктивной катушки. Применяя намагничивание контролируемого объекта постоянным магнитным полем и перемещая индукционный преобразователь в

неоднородном магнитном поле дефекта по гармоническому закону с оптимальным значением амплитуды и высокой частотой колебаний, можно одновременно обеспечить высокую абсолютную чувствительность к магнитным полям рассеяния дефекта и отстройку от внешних влияющих полей.

Возможные варианты схем контроля [2] определяются положением оси чувствительности индуктивной катушки преобразователя и направлением ее виброперемещения относительно контролируемой поверхности. Наиболее предпочтительны схемы контроля по нормальной или тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния дефекта с виброперемещением индуктивной катушки вдоль контролируемой поверхности.

В качестве примера на рис. 1 показана схема установки и направление виброперемещения индуктивной катушки 1 при контроле по тангенциальной составляющей. Катушка механически связана с приводом ее виброперемещения 2 посредством неферромагнитного стержня 3. Ось чувствительности катушки параллельна плоскости поверхности контролируемого объекта 4, намагниченного постоянным магнитным полем В. Силовые линии внешнего магнитного поля показаны штриховыми линиями, магнитные поля рассеяния дефектов — сплошными линиями.

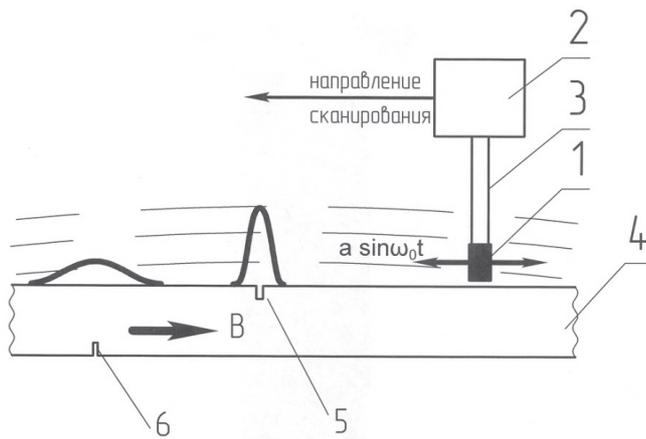


Рис. 1. Схема установки и направление виброперемещения индуктивной катушки: 1 — индуктивная катушка; 2 — привод виброперемещения; 3 — ферромагнитный стержень; 4 — контролируемый объект; 5 — поверхностный дефект; 6 — подповерхностный дефект

В процессе сканирования поверхности объекта катушка совершает колебания вдоль оси, параллельной контролируемой поверхности по гармоническому закону:

$$x(t) = a \sin \omega_0 t. \quad (1)$$

На бездефектных участках контролируемой поверхности магнитное поле в пределах области, ограниченной размерами катушки и диапазонов ее виброперемещения, квазиоднородно, в связи с чем ЭДС в катушке практически не наводится. Возможное возникновение переменной ЭДС с частотой  $\omega_0$  может быть связано только с незначительным различием тангенциальной составляющей вектора напряженности по вертикали в точках, соответствующих верхней и нижней области витков катушки.

При расположении вибрирующей катушки в неоднородных магнитных полях рассеяния, обусловленных наличием поверхностных 5 и подповерх-

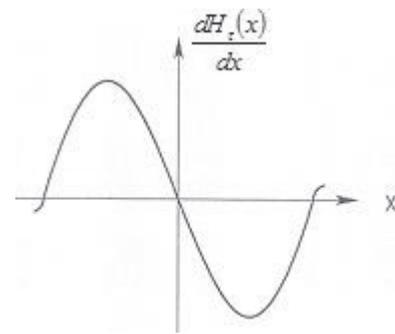


Рис. 2. График производной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния дефекта

ностных 6 дефектов, в ней наводится ЭДС, зависящая от значения производной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния дефекта в процессе виброперемещения катушки.

На рис. 2 показан график производной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния дефекта, имеющий вид знакопеременной функции с характерными участками возрастания и убывания [3].

Если плоскость центрального сечения катушки, перпендикулярного ее оси, располагается по центру поля рассеяния дефекта ( $x=0$ ), то за один период колебания катушки с амплитудой, превышающей координаты точек экстремумов функции  $dH_t(x)/dx$ , возникает двухполярный симметричный индуцированный сигнал  $e(t)$ , содержащий в качестве доминирующей гармонику удвоенной частоты по отношению к частоте виброперемещения (рис. 3).

При несимметричном расположении плоскости центрального сечения катушки относительно центра поля рассеяния дефекта симметрия индуциро-

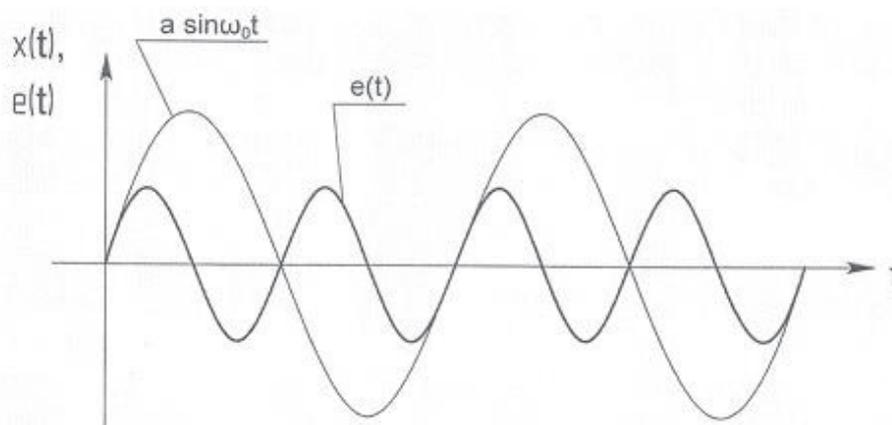


Рис. 3. Графики виброперемещения  $x(t)$  и индуцированного сигнала  $e(t)$

ванного сигнала нарушается. Гармонический состав и параметры периодического сигнала индуктивного преобразователя будут зависеть от значения смещения центрального сечения катушки  $l$  относительно точки  $x = 0$ .

Таким образом, в рассматриваемом примере информативным параметром электрического сигнала вибрирующей по гармоническому закону катушки, обусловленным наличием дефекта, является амплитуда гармоники с частотой  $2\omega_0$ . При этом максимальное значение амплитуды второй гармоники свидетельствует о положении катушки по центру магнитного поля рассеяния дефекта, что позволяет предположить высокую локальность определения местоположения дефекта виброиндукционным методом.

В общем случае форма и параметры индуцированного электрического сигнала  $e(t)$  при виброперемещении индукционного преобразователя вдоль оси  $x$  определяются из выражения

$$e(t) = -k \frac{dH(x)}{dx} \Big|_{x=(a \sin \omega_0 t + l)} \cdot a\omega_0 \cos \omega_0 t, \quad (2)$$

где  $H(x)$  — функция распределения нормальной или тангенциальной составляющей напряженности поля рассеяния дефекта вдоль оси  $x$ ;

$k$  — коэффициент, зависящий от магнитной проницаемости среды, числа витков и площади сечения катушки.

Применительно к схеме контроля (см. рис. 1) в выражении (2) используется математическая модель тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля дефекта вдоль оси  $x$ , описываемая функцией  $H_\tau(x)$ .

Так как рассмотренные в [3] математические модели функции  $H_\tau(x)$  носят приближенный характер и являются сложными для аналитических преобразований функциями, то при исследовании зависимости формы и параметров индуцированного сигнала от параметров виброперемещения катушки и ее расположения относительно магнитного поля рассеяния дефекта воспользуемся упрощенной моделью  $H_\tau(x)$ .

Как следует из [3], тангенциальная составляющая магнитного поля дефекта является монотонно возрастающей функцией при  $x < 0$ , принимая максимальное значение в точке  $x = 0$ , и монотонно убывающей функцией при  $x > 0$ . Этим условиям соответствует упрощенная модель функции  $H_\tau(x)$  в виде перевернутой параболы (рис. 4):

$$H_\tau(x) = \begin{cases} -b_0 x^2 + c, & |x| \leq \sqrt{\frac{c}{b}}; \\ 0, & x < -\sqrt{\frac{c}{b}}, \quad x > \sqrt{\frac{c}{b}}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $b, c$  — коэффициенты, значения которых зависят от характеристик дефекта (ширина раскрытия и глубина), а также зазора между контролируемой поверхностью и катушкой.

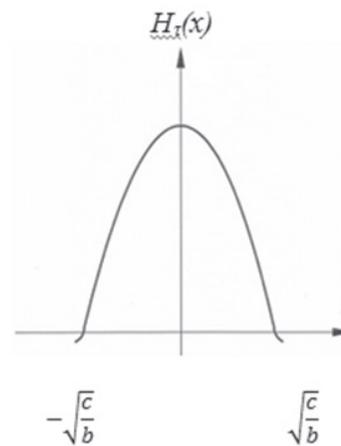


Рис. 4. Упрощенная модель функции  $H_\tau(x)$

Параметры  $b, c$  определяются экспериментально с помощью контрольных образцов с искусственными дефектами, причем с учетом их зависимости от магнитных свойств образцов.

После подстановки  $H_\tau(x)$  из (3) в выражение (2) и дифференцирования получим

$$e(t) = k(2a^2 b \omega_0 \sin \omega_0 t \cdot \cos \omega_0 t - 2abl \omega_0 \cos \omega_0 t) = k\omega_0(a^2 b \sin 2\omega_0 t - 2abl \cos \omega_0 t). \quad (4)$$

Из анализа выражения (4) следуют два важных вывода:

1. Индуцированная ЭДС представляет собой периодическую функцию, содержащую две гармоники — гармонику с частотой виброперемещения  $\omega_0$  и гармонику с удвоенной частотой  $2\omega_0$ . На рис. 5 показан электрический индуцированный сигнал, являющийся суперпозицией гармоник с частотами  $\omega_0$  и  $2\omega_0$ .

2. Амплитуда индуцированного сигнала линейно зависит от частоты виброперемещения  $\omega_0$ , квадратично — от амплитуды виброперемещения по второй гармонике и линейно — от амплитуды первой гармоники.

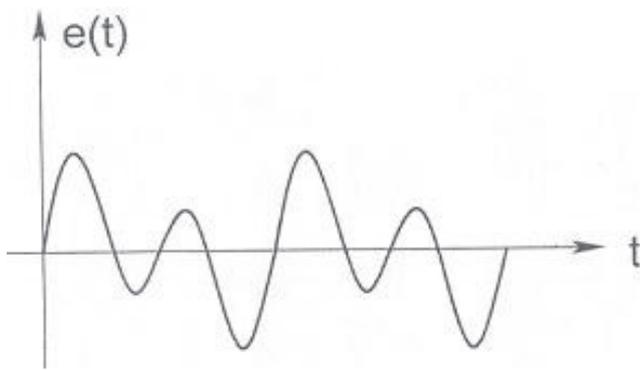


Рис. 5. Электрический индуцированный сигнал, являющийся суперпозицией гармоник с частотами  $\omega_0$  и  $2\omega_0$

Если в выражении (4) принять смещение центрального сечения катушки  $l=0$ , т.е. выполнение условия совмещения центрального сечения с центром магнитного поля рассеяния дефекта, то выражение (4) примет вид

$$e(t) = k\omega_0 a^2 b \cdot \sin 2\omega_0 t, \quad (5)$$

откуда следует, что индуцированный сигнал содержит только гармонику с частотой  $2\omega_0$ .

При значении амплитуды виброперемещения  $a = \sqrt{\frac{c}{b}}$ , т.е. в случае равенства амплитуды колебаний и границы поля рассеяния дефекта (см. рис. 4), амплитуда индуцированного сигнала принимает наибольшее значение

$$e(t) = k\omega_0 c \sin 2\omega_0 t, \quad (6)$$

поскольку  $H_{t \max}(x) = c$ .

При колебаниях катушки только в правой или левой области поля рассеяния дефекта (см. рис. 4) индуцированный сигнал будет содержать только гармонику с частотой виброперемещения  $\omega_0$

$$e(t) = 2k\omega_0 c \cos \omega_0 t, \quad (7)$$

принимая максимальное амплитудное значение при

амплитуде колебаний  $a = \sqrt{\frac{c}{b}}$ .

Таким образом, если рассматривать схему виброисследования (см. рис. 1), то при перемещении вибрирующей катушки вдоль контролируемой поверхности первым признаком наличия дефекта будет сначала резкое возрастание амплитуды первой гармоники в спектре сигнала  $e(t)$ . При дальней-

шем перемещении катушки к центру дефекта возрастает сигнал, являющийся суперпозицией гармоник с частотой  $\omega_0$  и  $2\omega_0$  с тенденцией возрастания амплитуды второй гармоники и убывания амплитуды первой гармоники. Это второй признак наличия дефекта. При совмещении центрального сечения катушки с центром магнитного поля рассеяния дефекта индуцированный сигнал содержит только вторую гармонику, амплитуда которой принимает наибольшее значение. Это третий, основной, признак наличия дефекта, имеющий селективное значение при локальности определения места расположения дефекта.

В случае схемы контроля по нормальной составляющей признаком наличия дефекта является резкое возрастание над поверхностью дефекта амплитуды первой гармоники.

### Выводы

Техническими преимуществами виброиндукционного метода магнитного контроля являются:

1. Высокая селективность выявления дефектов с малой глубиной и шириной раскрытия. По экспериментальным данным, при виброисследовании дефекта шириной раскрытия 3,5 мкм и глубиной 0,2 мм с частотой 500 Гц и амплитудой 0,4 мм удвоенная амплитуда выходного сигнала не менее 7 мВ с частотой 1000 Гц при шумовом уровне фона не более 0,5 мВ основной частоты 500 Гц, который отсекается при фильтрации.

2. Высокая локальность определения местоположения дефекта. Погрешность определения центрального сечения поля рассеяния дефекта типа трещины не превышает  $\pm 0,1$  мм.

3. Исключение необходимости применения компенсационных магниточувствительных элементов.

4. Возможность выявления поверхностных дефектов в труднодоступных местах сложнопрофильных изделий на расстоянии до 5 мм от контролируемой поверхности.

5. Надежное выявление подповерхностных дефектов, расположенных на глубине до 5 мм.

Приведенные экспериментальные данные получены с помощью контрольных образцов дефектов на экспериментальной установке, обеспечивающей относительное перемещение контрольного образца и индукционного преобразователя по трем координатам с разрешающей способностью 5 мкм, а также относительное изменение угловых положений преобразователя и контролируемого образца.

## Библиографический список

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т./ Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: в 3 кн. Кн. 1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. — 2-е изд., испр. — М.: Машиностроение, 2006. — 848 с.
2. Чернова А.В. Анализ схем контроля при виброиндукционной магнитной дефектоскопии // Сб. статей Международной научно-практической конференции, Уфа, Аэтерна, 30 июля 2014 г, с. 37-40.
3. Бакунов А.С., Горкунов Э.С., Щербинина В.Е. Магнитный контроль: Учеб.пособие/ Под общ. ред. В.В.Клюева. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 192 с.

## MAGNETIC TESTING SELECTIVITY IMPROVING BY VIBRATION-INDUCTION METHOD

Nikolaev Yu.L.\* , Chernova A.V.\*\*

Moscow State University of Instrumental Engineering and Computer Science,  
20, Stromynka str., Moscow, 107996, Russia

\* e-mail: leila\_nik@list.ru

\*\* e-mail: aleks.chernova@gmail.com

### Abstract

Implementation of gradiometry techniques for magnetic fields registration in the process of objects surface scanning is an effective approach to magnetic testing selectivity improving. We suggest vibratory inductive method based on induction transducer which sensitivity depends on the rate of change magnetic flux, coupled with turns of its inductance coil.

When vibrating coil moves along the surface under testing the first sign of blemish presence will be indicated by the first harmonic amplitude surge in the spectrum of induced electromotive force signal. With further movement of the coil towards the defect center a signal, representing a superposition of harmonics with frequencies  $\omega_0$  and  $2\omega_0$ , appears, with the tendency of increase in second harmonic amplitude and decrease in that of the first one. This is the second sign of a blemish presence. When the coil central section coincides with the center of fault stray magnetic field, the induced signal contains only second harmonic, which amplitude assumes the highest value. This is the third and the main sign of a blemish presence. It has a selective value with locality of flaw location.

In case of normal component testing circuit, the sign of blemish presence is revealed by a surge in the first harmonic amplitude over the fault surface.

The presented experimental data has been obtained through defected samples testing with a research facility, providing test sample movement against induction transducer according to three coordinates with resolution of 5 microns, as well as relative change of the transducer and test sample angular location.

**Keywords:** magnetic testing, induction transducer, vibroscanning, induced electromotive force, selective sensitivity, localization.

### References

1. Klyuev V.V. *Nerazrushayushchii kontrol'* (Non-destructive testing), Moscow, Mashinostroenie, 2006, vol. 6, book 3, 848 p.
2. Chernova A.V. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Ufa, Aeterna, 30 July 2014, pp. 37-40.
3. Bakunov A.S., Gorkunov E.S., Shcherbinina V.E. *Magnitnyi kontrol'* (Magnetic Testing), Moscow, Izdatel'skii dom «Spektr», 2011, 192 p.