

К. Б. Мягкохлеб, канд. техн. наук
О. Ф. Полищук, канд. техн. наук

Институт проблем машиностроения
 им. А. Н. Подгорного НАН
 Украины, г. Харьков, e-mail:
 mkb@ipmach.kharkov.ua
 polishchuk@ipmach.kharkov.ua

Ключові слова: дефект, вихровий струм, датчик дефектоскопа.

УДК 621.3(075)

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА ДЕФЕКТОСКОПА С Ш-ОБРАЗНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Подано результати дослідження електромагнітного вихрострумового датчика дефектоскопа з Ш-подібним осердям. Виявлено процеси, які виникають в осерді та матеріалі, що контролюється. Розглянуто варіанти без тріщини в контрольованому матеріалі, з тріщиною та з декількома тріщинами й виведено формули для визначення параметрів датчиків.

Введение

Создание приборов для обнаружения дефектов в материалах различных объектов, а именно, трещин и / или раковин является важной и актуальной для многих отраслей промышленности. Решение данной задачи позволяет своевременно выявить дефекты, которые могут привести к выходу из строя машин и оборудования.

Определенную нишу в неразрушающем контроле занимают вихретоковые дефектоскопы [1–4]. При их создании необходимо всесторонне исследовать процессы, обуславливающие их функционирование, представлять сложную картину электромагнитных преобразований, происходящих при взаимодействии датчиков с контролируемым объектом. Опубликованные работы по дефектоскопии [2–8], описывающие физическую суть процесса, недостаточно четко отражают конкретные физические преобразования, формирующие конечный результат – определение наличия или отсутствия дефекта в материале исследуемого объекта.

Основная часть

Дефектоскоп в целом состоит из датчика и электроизмерительной схемы. Датчик представляет собой электромагнитную систему (ЭМС), в неё входит Ш-образный магнитопровод с генераторной обмоткой на среднем сердечнике и двумя измерительными обмотками, расположенными на крайних сердечниках. Выходные зажимы измерительных обмоток включены встречно, то есть выходное напряжение $|U_{\text{вых}}| = |U_2 - U_1|$ или $|U_1 - U_2|$. Напряжение U_r подается от генератора гармонического сигнала

$$U_r = U_{ra} \sin \omega t ,$$

где ω – круговая частота ($\omega = 2\pi f$; f – частота, $f \geq 20$ кГц); t – время; U_{ra} – амплитуда.

В данной статье работу электроизмерительной схемы рассматривать не будем, но подробно проанализируем функционирование датчика.

Датчик представляет собой электромагнитную систему, изображенную на рис. 1.

При подаче на генераторную обмотку напряжения U_r в ней возникает ток

$$i_r = \frac{U_{ra} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{r^2 + (\omega L_r)^2}},$$

но обычно активное сопротивление обмотки намного меньше, чем его индуктивное сопротивление

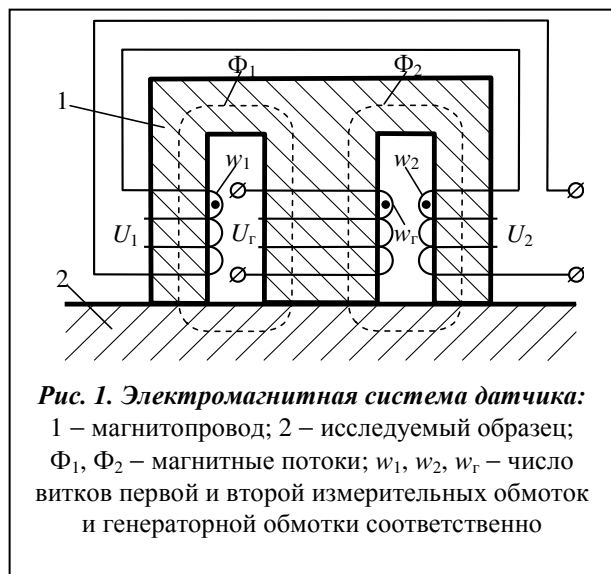


Рис. 1. Электромагнитная система датчика:
 1 – магнитопровод; 2 – исследуемый образец;
 Φ_1, Φ_2 – магнитные потоки; w_1, w_2, w_r – число витков первой и второй измерительных обмоток и генераторной обмотки соответственно

$r \ll \omega L_r$. Поэтому

$$i_r = \frac{U_{ra} \cos(\omega t)}{\omega L_r}.$$

Рассмотрим несколько случаев. Первый случай – в материале исследуемого образца трещин и раковин нет. Измерительные обмотки $w_1 = w_2$. Зазор между сердечником и материалом $\delta = 0$. Площадь поперечного сечения среднего сердечника в 2 раза больше, чем у крайних 1 и 2.

В этом случае магнитный поток поровну распределяется на первом и втором сердечниках

$$\Phi_r = i_r w_r G_r,$$

$$G_r = \frac{G_1 G'_r}{G_1 + G'_r} = \frac{G_2 G'_r}{G_2 + G'_r},$$

где $G_1 = G_2 = \frac{\mu S_1}{l_1} = \frac{\mu S_2}{l_2}$; $G'_r = \frac{\mu S_{cp}}{l_1} = \frac{\mu S_{cp}}{l_2}$; μ – магнитная проницаемость стали; $l_1 = l_2$ – средняя длина округленного периметра половины магнитопровода.

Так как Ш-образный сердечник полностью симметричен и $w_1 = w_2$, то $\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\Phi_r}{2}$,

$$U_1 = w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = U_2 = w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} \text{ и } U_1 - U_2 = 0.$$

При прохождении Φ_1 и Φ_2 через ферромагнитный материал в последнем в местах перехода магнитных потоков возникают вихревые электродвижущие силы (ЭДС) индукции

$$E_{cp.инд} = -\frac{d\Phi_r}{dt} = -\frac{d}{dt}(\Phi_1 - \Phi_2), \quad E_{1инд} = -\frac{d\Phi_1}{dt}, \quad E_{2инд} = -\frac{d\Phi_2}{dt},$$

число витков материала $w_m = 1$. Эти ЭДС создают вихревые токи $i_{1e} = \frac{E_{1инд}}{r_{m1}}$, $i_{2e} = \frac{E_{2инд}}{r_{m2}}$. Если выполняются описанные выше условия

равенства, то $i_{1в} = i_{2в}$. Эти токи, в свою очередь, создают вихревые магнитные потоки $\Phi_{1в} = i_{1в} G_{1в}$, $\Phi_{2в} = i_{2в} G_{2в}$, где $G_{1в}, G_{2в}$ – магнитные проводимости для $\Phi_{1в}, \Phi_{2в}$. (см. рис. 2.)

Электродвижущие силы $E_{1инд}, E_{2инд}$ направлены противоположно Φ_1, Φ_2 . Поэтому токи $i_{cp.в}, i_{1в}, i_{2в}$ и магнитные потоки $\Phi_{cp.в}, \Phi_{1в}, \Phi_{2в}$ также направлены противоположно основным потокам $\Phi_{cp}, \Phi_1, \Phi_2$. Тут мы не учитываем индуктивность и электрическую емкость материала. Тогда в каждом сердечнике Ш-образного магнитопровода результирующие магнитные потоки $\Phi_{1\Sigma} = (\Phi_1 - \Phi_{1в}), \Phi_{cp\Sigma} = (\Phi_{cp} - \Phi_{cp.в}), \Phi_{2\Sigma} = (\Phi_2 - \Phi_{2в})$.

При отсутствии трещин, раковин и полной симметрии ЭМС выходное напряжение измерительных обмоток $U_{вых} = 0$.

Второй случай. Магнитопровод находится в покое, в исследуемом материале, под сердечником 2 находится трещина или раковина, рис. 3.

Из рис. 3 видно, что при наличии трещины или раковины магнитный поток Φ_2 перераспределяется на Φ'_2 и Φ''_2 . Магнитный поток Φ'_2 – проходит через площадь поперечного сечения $S_2 - S_{тр}$, а Φ''_2 – через площадь $S_{тр}$, причем для Φ'_2 магнитная проницаемость $\mu = 10^3 \div 10^6$, а для $\Phi''_2 - \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$. В контролируемом металле присутствуют вихревые магнитные потоки $\Phi'_{2в}$ и $\Phi''_{2в}, \Phi'''_{2в}$, причем $\Phi'_{2в}$

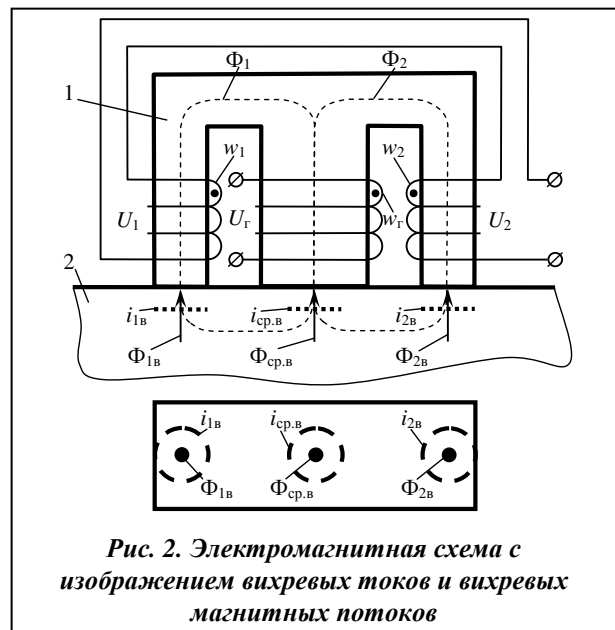


Рис. 2. Электромагнитная схема с изображением вихревых токов и вихревых магнитных потоков

направлен навстречу Φ'_2 , а $\Phi''_{2в}$ и $\Phi'''_{2в}$ направлены перпендикулярно боковым граням (считаем, что трещина имеет вид треугольника), но навстречу Φ''_2 .

Рассмотрим следующие случаи условного расположения трещины (рис. 4). Первый случай – треугольник трещины имеет вершину внизу. Поток $\Phi''_{2в}$ и $\Phi'''_{2в}$ направлены перпендикулярно граням, внутрь условной трещины (рис. 4 а).

Второй случай – трещина имеет вид, изображенный на рис. 4 б), то есть вихревые магнитные потоки направлены навстречу Φ''_2 под определенными углами. Итак, если под сердечником 2 имеется трещина (раковина), то магнитная проводимость G_2 меняется по сравнению с первым случаем, когда трещин нет. На поверхности без трещин $G_{21} = \frac{\mu(S - S_{тр})}{l}$, а на поверхности с трещиной

$$G_{22} = \frac{\mu_0 S_{стр}}{\delta_{тр}}, \delta_{тр} - \text{средняя высота трещины (предполагается, что трещина заполнена воздухом).}$$

Как видно из рис. 3, 4, при наличии трещины меняется направление вихревых магнитных потоков $\Phi''_{2в}$, $\Phi'''_{2в}$, меняется также магнитная проводимость G_2 , а это означает, что общий магнитный поток Φ_2 , состоящий из Φ'_2 , Φ''_2 , не равен магнитному потоку Φ_1 , что, в свою очередь, определяет разность в ЭДС индукции $U_1 - U_2 = w \left(\frac{d\Phi_1}{dt} - \frac{d\Phi_2}{dt} \right) = \Delta U = U_{вых}$, которая подается на вторичную схему, регистрирующую наличие в материале трещины.

На практике может быть такая ситуация, что рядом находятся несколько трещин. Также возможны варианты расположения трещин и раковин не на поверхности материала, а в глубине. Среди всех разновидностей расположения трещин и раковин только в варианте с полной идентичностью геометрии и расположения трещин под каждым магнитопроводом может быть $U_{вых} = 0$. В остальных случаях просматривается явная асимметрия магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 , что обуславливает наличие $U_{вых} \neq 0$.

Следует заметить, что в предлагаемом варианте датчика дефектоскопа в случае ферромагнитного исследуемого материала между магнитопроводом и материалом возникает тяговое усилие F , которое затрудняет продвижение датчика по материалу при поиске трещин. В связи с этим целесообразно определить зависимость силы F от параметров и физических величин в датчике и выбрать приемлемые значения с целью уменьшения F . Для данного исследования представим, что в схеме, изображенной на рис. 1, между магнитопроводом 1 и материалом 2 имеется воздушный зазор δ . Тяговое усилие F определяется в виде суммы двух усилий $F = F_1 + F_2$, где F_1 и F_2 – тяговые усилия левого и правого П-образного магнитопровода соответственно в общем Ш-образном магнитопроводе датчика.

Формулы F_1 и F_2 следующие [9]: $F_1 = F_2 = \frac{\Phi_1^2}{\mu_0 S} = \frac{\Phi_2^2}{\mu_0 S}$, где $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$.

$$F = \frac{2\Phi^2}{\mu_0 S}. \tag{1}$$

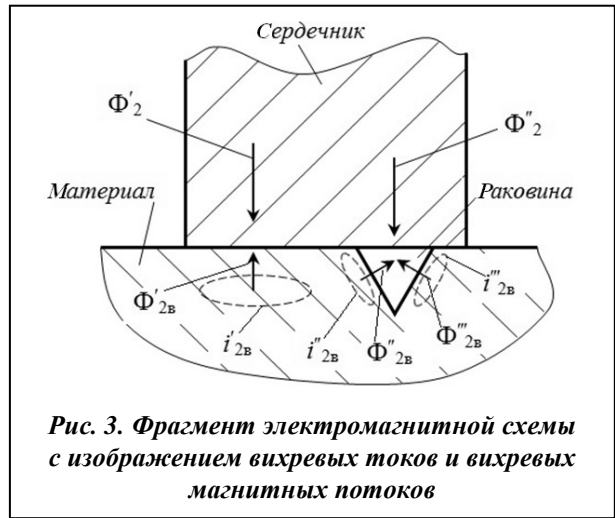


Рис. 3. Фрагмент электромагнитной схемы с изображением вихревых токов и вихревых магнитных потоков

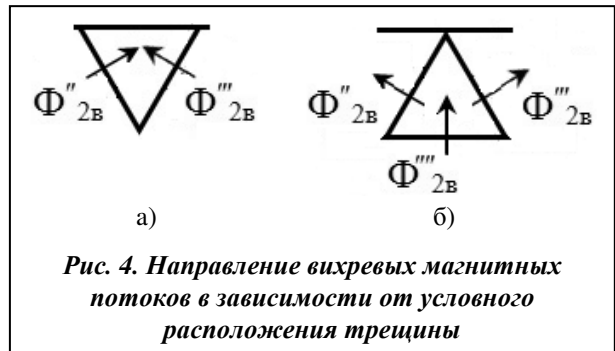


Рис. 4. Направление вихревых магнитных потоков в зависимости от условного расположения трещины

Считаем что Φ – общий магнитный поток в среднем сердечнике, $S = S_{cp}/2$, где S – площадь поперечного сечения крайних сердечников; S_{cp} – площадь поперечного сечения среднего сердечника. В соответствии с законом полного тока

$$\Phi = i_r w_r G, \quad (2)$$

где G – общая магнитная проводимость магнитного потока 2Φ

$$G_{л} = \frac{G_1 \frac{G_{cp}}{2}}{G_1 + \frac{G_{cp}}{2}}; \quad G_{np} = \frac{G_2 \frac{G_{cp}}{2}}{G_2 + \frac{G_{cp}}{2}},$$

$$G = G_{л} + G_{np}; \quad G_1 = G_2 = \frac{G_{cp}}{2} = \frac{\mu_0 S}{\delta}.$$

Тогда

$$G_{л} = \frac{\mu_0 S}{2\delta}; \quad G_{np} = \frac{\mu_0 S}{2\delta}; \quad G = \frac{\mu_0 S}{\delta}. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), получим

$$F = \left(\frac{i_r w_r}{\delta} \right)^2 \mu_0 S. \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что при $\delta \rightarrow 0$ $F \rightarrow \infty$. Ток $i_r = \frac{U_r}{\omega L_r}$, а $L_r = w^2 G = w^2 \frac{\mu_0 S}{\delta}$. Подставим эти выражения в (4)

$$F = \left(\frac{i_r w_r}{\delta} \right)^2 \mu_0 S = \frac{1}{\mu_0 S} \left(\frac{U_r}{\omega w_r} \right)^2. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что чем выше частота ω , тем меньше тяговое усилие F . Кроме того, из формулы ЭДС индукции как для выходных сигналов измерительных обмоток, так и для вихревых токов следует, что повышение частоты обеспечивает увеличение этих ЭДС, усиливая тем самым чувствительность датчика.

Выводы

Описана физика процессов, протекающих в Ш-образном сердечнике вихретокового электромагнитного датчика дефектоскопа совместно с контролируемым образцом. Рассмотрены случаи отсутствия дефекта (трещины или раковины) и наличия одного или нескольких дефектов. Проанализированы несколько случаев условного изображения и расположения дефектов. Выведены формулы для определения зависимости тягового усилия от частоты генерируемых сигналов в случае ферромагнитного исследуемого материала. Показано, что чем выше частота, тем меньше тяговое усилие. Кроме того, из формулы электродвижущей силы индукции как для выходных сигналов измерительных обмоток, так и для вихревых токов увеличение частоты обеспечивает увеличение чувствительности датчика.

Литература

1. Божко А. Е. Элементы прикладной теории электромагнитных дефектоскопов / А. Е. Божко, О. Ф. Полищук // Доп. НАН України. - 2007. - № 11. - С. 34–41.
2. Коннов А. В. Анализ и интерпретация сигналов при неразрушающем контроле стальных газопроводов электромагнитным сканером-дефектоскопом АСД «Вихрь» / А. В. Коннов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. - 2013. - № 5. – С. 385–401.
3. Бакунов А. С. Новые практические достижения в области вихретоковой дефектоскопии / А. С. Бакунов, А. Г. Ефимов, А. Е. Шубочкин // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Тез. докл. 8-й. междунар. конф. – М., 2009 - С. 48.

4. *Неразрушающий* контроль: Справочник: в 7 т. Т. 2 / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
5. *Учанин В. Н.* Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации / В. Н. Учанин // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 4. – С. 24–30.
6. *Учанин В. М.* Розширення можливостей вихреструмових дефектоскопів автогенераторного типу / В. М. Учанин // Методи та прилади контролю якості. – 2008. – № 21. – С. 30–35.
7. *Бакунов А. С.* Вихретоковый неразрушающий контроль в дефектоскопии металлоизделий / А. С. Бакунов, А. Г. Ефимов // Контроль. Диагностика. 2009. – № 4. – С. 21–22.
8. *Вихретоковые* дефектоскопы нового поколения / Д. В. Шлеин, В. Ф. Мужичкий, В. А. Карабчевский, Е. Ю. Кортман // В мире неразрушающего контроля. – СПб. – 2007. – № 2. – С. 20–24.
9. *Божко А. Е.* Сравнительный анализ П и Ш-образных магнитопроводов электромагнитных вибровозбудителей / А. Е. Божко, В. И. Белых, К. Б. Мягкохлеб // Компрессор. и энерг. машиностроение. – 2006. – № 4(6). – С. –93.

Поступила в редакцию 27.10.17