

УДК 620.179.14

Б. М. Горкунов, д-р техн. наук, С. Г. Львов, канд. техн. наук, И. Б. Горкунова, И. Х. Шахин
Национальный технический университет "ХПИ", г. Харьков, Украина

МНОГОПАРАМЕТРОВЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТОКОПРОВОДОВ

В работе рассмотрен принцип построения электромагнитного преобразователя с пространственно-периодическим полем для контроля магнитных, электрических и геометрических параметров цилиндрических протяженных металлических изделий. Получены основные математические выражения, описывающие распределение напряженности электромагнитного поля внутри изделия, между изделием и обмотками преобразователя, а также за проводниками преобразователя. Библ. 7, рис. 1.

Ключевые слова: электромагнитный преобразователь, напряженность магнитного поля, магнитная проницаемость, электропроводность.

У роботі розглянуто принцип побудови електромагнітного перетворювача з просторово-періодичним полем для контролю магнітних, електричних і геометричних параметрів циліндричних протяжних металевих виробів. Отримано основні математичні вирази, що описують розподіл напруженості електромагнітного поля всередині виробу, між виробом і обмотками перетворювача, а також за провідниками перетворювача. Бібл. 7, рис. 1.

Ключові слова: електромагнітний перетворювач, напруженість магнітного поля, магнітна проникність, електропровідність

Введение

Контроль качества выпускаемой продукции в энергетической и машиностроительной промышленности, а также непрерывная диагностика работающего оборудования требует дальнейшего увеличения точности, чувствительности и надежности применяемых средств неразрушающего контроля. Для расширения функциональных возможностей средств неразрушающего контроля с учетом увеличения номенклатуры контролируемых параметров актуальна задача развития многопараметровых средств и методов контроля информативных параметров. В частности к этим методам относятся электромагнитные.

В настоящее время особый практический интерес представляет развитие многопараметровых методов измерений, которые позволяют получить наиболее полную информацию об исследуемом

объекте. В этой связи неоспоримые достоинства имеют вихретоковые методы и устройства, выходные сигналы которых зависят от многих параметров объекта и преобразователя.

Анализ научных исследований и публикаций

Для одновременного определения двух параметров изделия наиболее удобным является использование вихретоковых преобразователей (ВТП), работающих на одной, фиксированной частоте питающего тока. В этом случае измеряют два признака выходного сигнала ВТП, а затем решают систему из двух уравнений, связывающих, измерительные признаки сигнала с параметрами изделия [1, 2].

При одновременном определении трех и более информативных параметров исследуемого объекта необходимо использовать большее число независимых уравнений. А это значит, что нужно измерять большее число электрических параметров преобразователя. Такие параметры можно определять с помощью ВТП, работающем на основе метода нескольких фиксированных частот, суть которого состоит в том, что изделие зондируется полями двух и более частот, а затем в выходных сигналах устройства выделяют по два признака (например, амплитуду и фазу), соответствующих тем или иным фиксированным частотам [3].

Однако, использование этого метода на практике осложняется в связи с трудностями фазовой синхронизации синусоидально изменяющихся во времени зондирующих полей и выделение выходных электрических параметров (и их признаков) из результирующего сигнала ВТП.

Этот же недостаток, связанный с трудностью обработки выходного результирующего сигнала, относится и к ВТП, работающим на основе использования импульсных зондирующих полей и определение зависимости выходного сигнала от времени с последующим выделением требуемых временных гармоник (и их характерных признаков), по которым можно судить о многих параметрах изделия [4].

Оказывается, как будет показано ниже, одновременные многопараметровые измерения можно упростить, если использовать пространственно-периодические магнитные поля, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону на одной фиксированной частоте.

Основной материал

В настоящей работе на основе такого подхода рассматриваются вопросы теории вихретоковых преобразователей для многопараметровых измерений с магнитными полями, имеющими пространственно-периодическую структуру.

Рассмотрим задачу об определении распределения переменного во времени магнитного поля проводника с током, расположенного на некотором расстоянии d от центра ферромагнитного цилиндра с радиусом a (см. рис. 1).

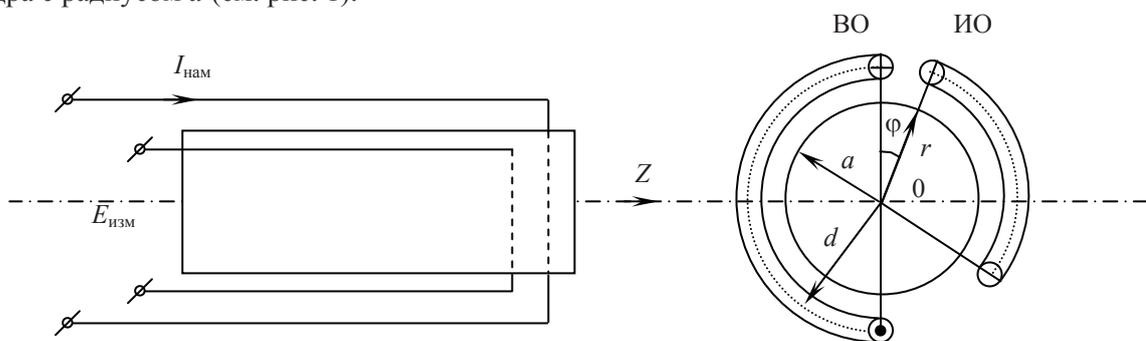


Рис. 1. Взаимное расположение объекта контроля, возбуждающего и измерительного проводников электромагнитного преобразователя

Предполагается, что длины цилиндра и проводника значительно превышают характерные поперечные размеры (то есть a и d соответственно).

Воспользовавшись уравнением Максвелла и законом Ома [5-7], получим уравнение магнитного поля в проводящей среде. При условии постоянства в цилиндрическом изделии магнитной проницаемости μ и удельной электрической проводимости σ это уравнение имеет вид:

$$\Delta \vec{H} = \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля, μ_0 – магнитная константа.

Рассматривается квазистатическое электромагнитное поле, длина волны которого больше характерных поперечных размеров проводника и цилиндра. Для определенности считаем, что поле в

сплошном цилиндрическом изделии с осью Z в цилиндрической системе координат (см. рис. 1) создается протекающим по нитевидному проводнику с током I в положительном направлении оси Z . Магнитное поле такого тока имеет только поперечные составляющие $\vec{H}(H_r, H_\varphi, H_0)$, где H_r и H_φ – r -ая и φ -ая компоненты напряженности магнитного поля.

Закономерности распределения поля в цилиндрическом изделии найдем, решая уравнение (1) совместно с граничными условиями:

на поверхности цилиндра $r = a$

$$\vec{n} = (\vec{B}^{(i)} - \vec{B}^{(m)}) = 0, \quad (2)$$

$$\vec{n} = (\vec{H}^{(i)} - \vec{H}^{(m)}) = 0, \quad (3)$$

на поверхности цилиндра $r = d$

$$\vec{n} = (\vec{B}^{(l)} - \vec{B}^{(m)}) = 0, \quad (4)$$

$$\vec{n} = (\vec{H}^{(l)} - \vec{H}^{(m)}) = \vec{j}, \quad (5)$$

где верхние индексы в круглых скобках соответствуют полям различных областей:

(i) – внутри цилиндрического изделия ($0 \leq r < a$);

(m) – между поверхностью изделия и поверхностью цилиндра с радиусом d ($a < r < d$);

(l) – за поверхностью этого цилиндра ($d < r < \infty$), \vec{j} – вектор плотности тока I , \vec{n} – вектор нормали к поверхности цилиндрического изделия.

Условия (2)-(4) выражают непрерывность нормальных составляющих вектора индукции B и тангенциальных составляющих вектора напряженности магнитного поля при переходе из данной среды в другую, а равенство (5) характеризует скачок напряженности поля при переходе поверхности цилиндра $r = d$, в которой протекает ток. Этот ток, имеющий один компонент вдоль оси Z (см.рис. 1), удобно представить в виде ряда Фурье

$$j_Z(\varphi, t) = e^{i\omega t} \frac{I}{d} \delta(\varphi) = e^{i\omega t} \left[j_0 + \sum_{n=1}^{\infty} j_n \cos(n\varphi) \right], \quad (6)$$

где n – номер пространственной гармоники;

t – время;

ω – циклическая частота;

$\delta(\varphi)$ – дельта-функция.

$$H_r(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} j \sum_n f_n(r) \sin(n\varphi), \quad (7)$$

$$H_\varphi(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} j \sum_n g_n(r) \cos(n\varphi), \quad (8)$$

где $f_n(r)$ и $g_n(r)$ – пока неизвестные функции.

Поскольку рассматриваемое магнитное поле имеет две компоненты, то и в координатном представлении уравнение (1) эквивалентно следующей системе:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{df_n}{dr} \right) - \frac{n^2 + 1}{r^2} f_n + \frac{2n}{r^2} g_n = \sigma \mu i \omega f_n, \quad (9)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dg_n}{dr} \right) - \frac{n^2 + 1}{r^2} g_n + \frac{2n}{r^2} f_n = \sigma \mu i \omega g_n. \quad (10)$$

Эта система уравнений с учетом граничных условий (2)-(5) имеет решения:

$$f_n^{(i)}(r, i\omega) = \frac{j_n}{D_n(i\omega)} \left(\frac{a}{d} \right)^{n-1} \left[I_{n-1}(y\sqrt{i}) - I_{n+1}(y\sqrt{i}) \right]; \quad (11)$$

$$g_n^{(i)}(r, i\omega) = \frac{j_n}{D_n(i\omega)} \left(\frac{a}{d} \right)^{n-1} \left[I_{n-1}(y\sqrt{i}) + I_{n+1}(y\sqrt{i}) \right]; \quad (12)$$

$$f_n^{(m)}(r, i\omega) = -\frac{j_n}{D_n(i\omega)} \left(\frac{a}{d} \right)^{n-1} \left[(\mu - 1) I_{n-1}(x\sqrt{i}) - (\mu + 1) I_{n+1}(x\sqrt{i}) \right] \left[\left(\frac{r}{d} \right)^{n-1} - \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \right]; \quad (13)$$

$$g_n^{(m)}(r, i\omega) = -\frac{j_n}{D_n(i\omega)} \left(\frac{a}{d}\right)^{n-1} \left[(\mu-1)I_{n-1}(x\sqrt{i}) - (\mu+1)I_{n+1}(x\sqrt{i}) \right] \left[\left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} + \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \right]; \quad (14)$$

$$f_n^{(l)} = -g_n^{(l)}(r, i\omega) = \frac{j_n}{2D_n(i\omega)} \left(\frac{d}{r}\right)^{n+1} \left\{ \left[\mu+1 + (\mu-1)\left(\frac{a}{d}\right)^{2n} \right] I_{n-1}(x\sqrt{i}) - \left[\mu-1 + (\mu+1)\left(\frac{a}{d}\right)^{2n} \right] I_{n+1}(x\sqrt{i}) \right\}, \quad (15)$$

где обобщенные параметры $x = a\sqrt{\mu_0\mu\sigma\omega}$, $y = r\sqrt{\mu_0\mu\sigma\omega}$, дискриминант $D_n(i\omega) = [(\mu+1)I_{n-1}(x\sqrt{i}) - (\mu-1)I_{n+1}(x\sqrt{i})]$, I_{n+1}, I_{n-1} – модифицированные функции Бесселя первого рода соответствующих порядков.

Таким образом, при известных значениях μ , σ изделия, размерах a , d , величинах тока I и текущего радиуса r по формулам (11)-(15) можно вычислить функции $f_n(r, \varphi, t)$ и $g_n(r, \varphi, t)$ для любой пространственной гармоники, а по этим функциям составить картину распределения поля в любой интересующей нас области (внутри изделия, между изделием и проводником с током, а также за этим проводником).

Выражения (11)-(15) описывают магнитные поля нитевидного проводника с током, имеющего бесконечно малые поперечные размеры, в действительности, на практике всегда используются проводники с конечной шириной и радиальной высотой. Последнее удобно реализовать в одном из двух конструктивных вариантах: использование ленточного проводника с током либо наборного полюса, содержащего множество тонких проводников с токами, текущими вдоль образующей цилиндра в одном и том же направлении (например, вдоль оси Z). В последнем случае токи отдельных проводников создают суммарный ток полюса.

Учет радиальной толщины ленты либо полюса с суммарным током, создающим поле, приводит к замене в формулах для напряженностей поля нитевидного тока значения r на некоторый эффективный радиус, величина которого зависит от формы полюса.

Для учета конечной ширины полюса с суммарным током (либо ленты) в формулах (7) и (8) заменим координату φ на $(\varphi - \alpha)$ и проинтегрируем эти формулы по α в пределах от $-\gamma$ до γ (где γ – угловая полуширина полюса). В результате получим:

$$H_r(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} j \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r) \sin(n\varphi), \quad (16)$$

$$H_\varphi(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} j \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} g_n(r) \cos(n\varphi). \quad (17)$$

Выводы

Из соотношении (16) и (17) следует, что при конечной величине γ отношение $\sin(n\gamma)/n\gamma < 1$, что приводит к уменьшению амплитуды n -ой пространственной гармоники поля ленточного проводника либо полюса с током по сравнению с амплитудой той же гармоники поля нитевидного проводника. Причем, как видно с ростом номера гармоники это уменьшение амплитуды поля становится существенным. Последнее можно использовать для подавления влияния гармоник с высокими номерами на результирующее магнитное поле. Следует отметить, что в пределе $\gamma \rightarrow 0$ (16) и (17) переходят в (7) и (8) соответственно.

Список литературы

1. Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т. III-7/В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др.; Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение. – 1996. – 464 с.
2. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль /Под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с.
3. Горкунов Б. М., Тюпа И. В. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий //Вестник НТУ "ХПИ", Харьков. – № 5. – 2004. – С. 93–99.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
5. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Т. 2. –Л.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
6. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Гос. издательство физико-математической литературы, 1959. – 532 с.

7. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и М. Стиган. – М.: Наука, 1979.

MULTIPARAMETER ELECTROMAGNETIC METHOD OF CONTROL CYLINDRICAL ELECTRICAL PATHWAY

B. M. Gorkunov, S. G. Lvov, I.B. Gorkunova, I.H Shahin
NTU "KPI", e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

In the paper the principle of electromagnetic transducer with a spatially periodic magnetic field to control, electrical and geometrical parameters of cylindrical elongated metal products. Obtain the basic mathematical equations that describe the distribution of the electromagnetic field inside the product, product in-between it and the transmitter coils, as well as agents of the converter. Ref. 7, Fig. 1.

Keywords: *electromagnetic transducer, magnetic field, magnetic permeability, electrical conductivity.*

1.Measurement, monitoring, testing and diagnosis. V.III-7/V.V. Kluev, F.R. Sosnin, V.N. Filinov, etc.; Ed. V.V. Klyuyev. – Moscow: Mashinostroenie, – 1996. – 464 p. (Rus.)

2.Non-destructive testing. In the 5 books. Book 3. Electromagnetic Testing / Ed. V.V. Sukhorukov. – Moscow: Vyshaya shkola, 1992. – 312p. (Rus.)

3.Gorkunov B. M., Tyupa I.V. Eddy current two-parameter control of ferromagnetic cylindrical products // Vesnik NTU "HPI", Kharkov. – № 5. – 2004. – P. 93–99. (Rus.)

4.Non-destructive testing: Reference book: At 7 vol. Ed. V. V. Klyuyev. Vol. 2: In 2 books. - Moscow: Mashinostroenie, 2003. – 688 p. (Rus.)

5. Neiman L. R., Demirchan K. S. Theory of Electrical Engineering, in 2 vol. Textbook for high schools. V.2. –Leningrad: Energoizdat, 1981. – 415 p. (Rus.)

6.Landau L. D., Lifshitz E.M. Electrodynamics of continuous environments. – Moscow: Publishers physical and mathematical literature, 1959. – 532 p. (Rus.)

7.Reference book of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables / Ed. M. Abramovitsa and M. Stigan. – Moscow: Nauka, 1979. (Rus.)