

МНОГОПАРАМЕТРОВЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, Н. Н. Сиренко, Шибан Тамер

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Аннотация. Рассмотрена физико-математическая модель электромагнитного преобразователя с неоднородным зондирующим полем, созданным бесконечно длинным проводником с током. Получены соотношения, описывающие работу многопараметровых электромагнитных преобразователей с пространственно-периодической структурой поля. Разработан трансформаторный преобразователь и проведен сравнительный анализ полученных результатов контроля параметров исследуемых изделий разработанными методами с расчетными значениями.

Ключевые слова: пространственно-периодическое поле, электромагнитный преобразователь, магнитная проницаемость, удельная электрическая проводимость.

Введение

В настоящее время особый научный и практический интерес представляют многопараметровые методы неразрушающего контроля, которые позволяют получать наиболее полную информацию об исследуемом объекте. Неразрушающий контроль и техническая диагностика являются приоритетными направлениями при обеспечении надежной и безопасной работы промышленного оборудования. Именно непрерывный контроль качества материала в состоянии поставки, в процессе проведения технологических операций при изготовлении деталей, а также в процессе их дальнейшей эксплуатации обеспечивает надежность и безопасность. Самыми распространенными материалами, используемыми для изготовления изделий в промышленности, энергетике и на транспорте являются магнитные и немагнитные электропроводящие материалы различного сортамента. По сравнению с непроизводительными и дорогостоящими разрушающими механическими и химическими методами испытаний, а также другими физическими методами неразрушающего контроля электромагнитный метод наиболее эффективен при исследовании металлических изделий и конструкций. Такие достоинства электромагнитного метода, как высокая производительность, быстрое действие, многопараметровость, электрическая форма выходного сигнала и слабая зависимость от температуры, давления, влажности и загрязнения поверхности исследуемых объектов открывают широкие возможности его применения в системах комплексного автоматического контроля качества материалов и изделий в промышленности [1-4].

© Горкунов Б. М., Львов С. Г.,
Сиренко Н. Н., Шибан Тамер, 2019

Как будет показано ниже, если найти способы выделения требуемых и подавления мешающих пространственных гармоник, а также ввести нормированные параметры сигналов электромагнитного преобразователя (ЭМП) и получить универсальные функциональные зависимости этих параметров от характеристик контролируемого изделия, то можно существенно упростить реализацию метода одновременного измерения магнитной проницаемости μ_r , удельной электрической проводимости σ и радиуса a изделия.

1. Физико-математическая модель многопараметрового ЭМП с пространственно-периодической структурой поля

Рассмотрим физико-математическую модель первичного ЭМП с неоднородным полем, у которого зондирующее магнитное поле имеет трансляционную симметрию. Типичным примером трансляционной симметрии может быть электромагнитное поле бесконечно длинного проводника с током (см. рис. 1).

Сочетание такого проводника и цилиндрического металлического изделия характеризует самый простой тип ЭМП с неоднородным полем при наличии трансляционной симметрии.

Следует отметить, что отдельные, частные случаи взаимодействия неоднородного поля проводников с током, расположенных вблизи проводящего изделия различной конфигурации рассматривались в работах [5,6].

Однако вопросы использования подобных полей применительно к ЭМП, сочетающих в себе определенным образом расположенные намагничивающие (НО) и измерительные (ИО) обмотки, которые позволяют определять одновременно μ_r , σ и a исследуемого изделия, практически не исследовались в литературе.

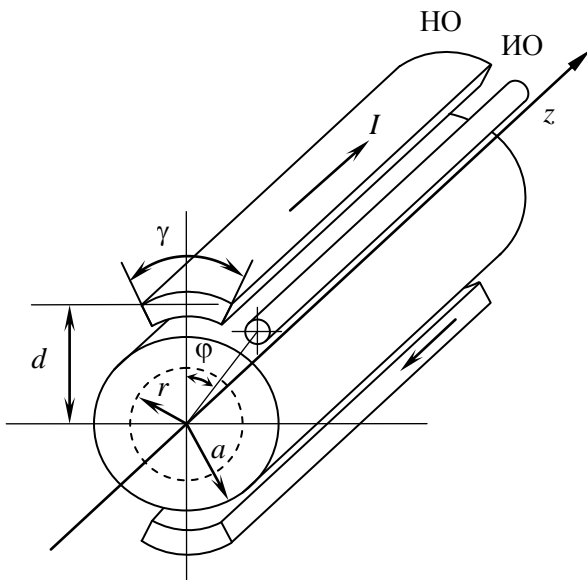


Рис. 1. Намагничивающая система проводника с током, имеющая трансляционную симметрию магнитного поля

Решим задачу распределения в пространстве переменного во времени магнитного поля проводника с током заданной частоты, расположенного на некотором расстоянии d от центра металлического цилиндра радиуса a (см. рис. 1).

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

Воспользовавшись материалами [5,7], при условии постоянства в цилиндрическом изделии μ_r и σ , можно записать уравнение распределения магнитного поля в проводящей среде, общий вид которого:

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

где $\Delta \vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная константа; t – время.

Рассматривается квазистатическое электромагнитное поле, длина волны которого больше характерных поперечных размеров проводника и цилиндра. Считаем, что поле в сплошном цилиндрическом изделии с осью z создается протекающим по нитевидному проводнику током I в совпадающем направлении с осью z .

Магнитное поле такого проводника с током в цилиндрической системе координат имеет только радиальную и угловую поперечные составляющие H ($H_r, H_\phi, 0$), где H_r и H_ϕ – r -я и ϕ -я составляющие вектора напряженности магнитного поля соответственно [5,7,8].

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 \vec{B} и тангенциальных составляющих вектора напряженности \vec{H} магнитного поля при переходе из одной среды в другую, а равенство (5) характеризует скачок напряженности поля при переходе к поверхности цилиндра $r = d$, в котором протекает ток. Этот ток, имеющий один компонент вдоль оси z (см. рис. 1) можно представить в виде ряда Фурье:

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

где n – номер пространственной гармоники; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота возбуждающего тока; $\delta(\phi)$ – дельта-функция.

Коэффициенты преобразования Фурье j предполагаются известными, поскольку задан полный ток нитевидного проводника.

Выражения для составляющих напряженности магнитного поля внутри и вне цилиндрического изделия также можно записывать в виде рядов по пространственным гармоникам:

$$H_r(r, \phi, t) = e^{i\omega t} \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r) \sin(n\phi); \quad (7)$$

$$H_\phi(r, \phi, t) = e^{i\omega t} \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} g_n(r) \cos(n\phi); \quad (8)$$

где $f_n(r)$, $g_n(r)$ – функции, определяющие реакцию электромагнитного поля на исследуемое изделие.

На практике используются проводники с конечной шириной и радиальной высотой.

Учет толщины ленты либо полюса с суммарным током, создающим поле, приводит к за-

мене в формулах для напряженностей поля нитевидного тока значения r на некоторый эффективный радиус, величина которого зависит от формы полюса.

Из соотношений (7) и (8) следует, что при конечной величине γ отношение $\frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} < 1$, 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. Это можно использовать для подавления влияния гармоник с высокими номерами на результирующее магнитное поле.

Поскольку рассматриваемое магнитное поле имеет две компоненты, то в координатном представлении уравнения (7) и (8) эквивалентны следующей системе:

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

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

Эта система уравнений с учетом граничных условий (2) – (5) имеет решение внутри изделия:

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

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

где $D_n(i, \omega) = [(\mu_r - 1)I_{n-1}(x\sqrt{i}) - (\mu_r + 1)I_{n+1}(x\sqrt{i})]$ – дискриминант функции, $x = a\sqrt{\mu_0\mu_r\sigma\omega}$, $y = r\sqrt{\mu_0\mu_r\sigma\omega}$ – обобщенные параметры, I_{n+1} и I_{n-1} – модифицированные функции Бесселя первого рода соответствующих порядков [9,10].

Таким образом, при известных значениях μ_r и σ изделия, размерах a , и d , величинах амплитуды и частоты возбуждающего тока I и текущего радиуса r по формулам (11) – (12) можно вычислить функции $f_n(r)$ и $g_n(r)$ для любой пространственной гармоники. Следовательно, по этим функциям можно составить картину распределения поля в любой интересующей нас области (внутри изделия, между изделием и проводником с током, а также за этим проводником).

Полученные выражения (7) – (12) описывают картину распределение напряженности маг-

нитного поля по r -й и ϕ -й составляющей, создаваемого током одного проводника (либо полюса с конечными угловыми размерами). Эти выражения используются для нахождения распределения напряженности магнитного поля внутри и снаружи исследуемого изделия для всех номеров пространственных гармоник.

2. Основные соотношения, описывающие работу ЭМП с пространственно-периодической структурой поля

При создании первичных ЭМП с пространственно-периодической структурой поля целесообразно использовать трансформаторные преобразователи, у которых измерительные обмотки размещаются на радиусах $r \approx a$, меньших, чем радиус размещения намагничивающей обмотки d . Это позволяет выделить несколько первых преобладающих гармоник, поскольку остальные затухают, как $(a/d)^{n-1}$.

При этом наличие трансляционной симметрии поля дает возможность использовать достаточно узкие петлевые (рамочные) измерительные обмотки ИО, расположенные вдоль изделия параллельно намагничивающим обмоткам НО, как показано на рис. 1.

Данные обмотки могут пронизывать H_r или H_ϕ составляющие напряженности магнитного поля. В первом случае плоскость измерительной обмотки должна быть перпендикулярна к координате r , а во втором случае перпендикулярна к координате ϕ .

К примеру, если поместить ИО между изделием и НО ($a < a_n < d$), то для определения r -ой составляющей ЭДС преобразователя с изделием, исходя из выражений (9) – (12), получим формулы для вычисления модуля и фазы:

$$E_r^{(n)} = -i\omega W_\Pi \Phi_r = -i\omega \mu_0 e^{i\omega t} \frac{IW_\Pi}{2\pi d} W_\Pi S \times \quad (13)$$

$$\times \sum_n \left[1 + h_r^{(n)} \left(\frac{a}{a_\Pi} \right)^{2n} \right] \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} \cos(n\phi)$$

$$\text{tg } \Phi^{(n)} = \text{Im} h_r^{(n)} / \text{Re} h_r^{(n)} \quad (14)$$

Здесь Φ_r мгновенное значение магнитного потока (r -ая составляющая); S – площадь сечения ИО; W_Π и W_Π – количество витков НО и ИО; комплексный параметр $h_r^{(n)}$ характеризует реакцию изделия на возбуждающее поле (n -я гармоника), который находим как:

$$h_r^{(n)} = \frac{A_{h1} B_{h1} + A_{h2} B_{h2}}{B_{h1}^2 + B_{h2}^2} + i \frac{A_{h2} B_{h1} - A_{h1} B_{h2}}{B_{h1}^2 + B_{h2}^2} \quad (15)$$

$$A_{h1} = (\mu_r - 1) \text{ber}_{n-1} x + (\mu_r + 1) \text{ber}_{n+1} x, \quad (16)$$

$$A_{h2} = (\mu_r - 1)bei_{n-1}x + (\mu_r + 1)bei_{n+1}x, \quad (17)$$

$$B_{h1} = (\mu_r + 1)ber_{n-1}x + (\mu_r - 1)ber_{n+1}x, \quad (18)$$

$$B_{h2} = (\mu_r + 1)bei_{n-1}x + (\mu_r - 1)bei_{n+1}x. \quad (19)$$

Формулы (16) – (19) получены с учетом выражений (11), (12) и представления модифицированных функций Бесселя в соответствующие $ber_n x$, $bei_n x$ функции Кельвина [9,10].

При этом выражение для нахождения ЭДС преобразователя без изделия имеет вид [11]:

$$E_{r0}^{(n)} = -i\omega W_n \Phi_{r0} = -i\omega \mu_0 e^{i\omega t} \frac{IW_n W_n S}{2\pi d} \times \sum_n \left(\frac{a}{d}\right)^{n-1} \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} \cos(n\varphi) \quad (20)$$

Зачастую, с целью повышения чувствительности ЭМП при проведении многопараметровых измерений, предпочтительно пользоваться не абсолютными значениями ЭДС и фазы, а вносимыми значениями нормированной составляющей ЭДС и фазы n -й пространственной гармоникой выходного сигнала преобразователя.

При использовании намагничивающей системы с двумя полюсами, по которым протекают токи противоположного направления (см. рис. 1), в измерительных обмотках отсутствуют четные гармоники.

Для примера, на рис. 2. приведена развернутая картина распределения нечетных гармоник ЭДС (с 1-ой по 7-ю) для ЭМП с пространственно-периодической структурой поля без исследуемого изделия вдоль угловой координаты φ на боковой поверхности цилиндра с осью z и окружности основания радиуса d .

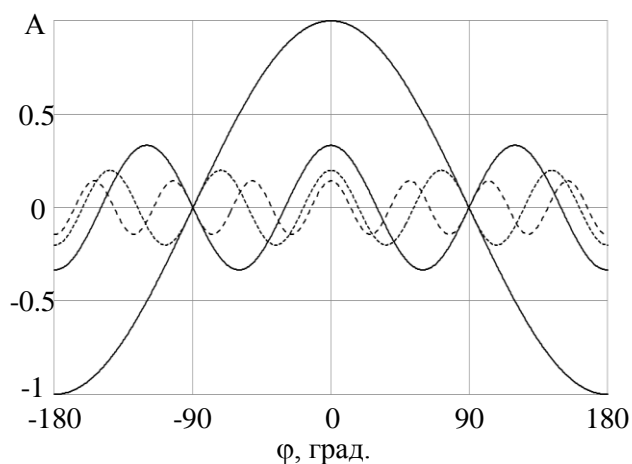


Рис. 2. Пример распределения нечетных пространственных гармоник ЭДС электромагнитного преобразователя без изделия

Распределение пространственных гармоник чисто теоретическое представление выходного

сигнала ЭМП. Измеренные же значения ЭДС на выходе каждой из измерительных обмоток преобразователя, размещенных в фиксированных точках с угловой координатой φ , при изменении φ в диапазоне от $-180 \leq \varphi \leq 180$ градусов, в действительности будут иметь значения соответствующие алгебраической сумме всех гармоник с учетом их фазы.

В работе выполнен расчет значений суммарной ЭДС (E_Σ) и проведено сравнение с экспериментально полученными значениями E_Σ для каждой из измерительных обмоток преобразователя.

Выражение для расчета E_Σ в измерительной обмотке преобразователя размещенной в любой точке φ -й координаты определяют из выражения:

$$E_\Sigma = \sum_n E_n \cos(n\varphi), \quad (21)$$

где E_n – амплитуда n -й гармоники; $n = 2m + 1$ – номер гармоники, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

3. Расчетные и экспериментально полученные значения амплитуды и фазы выходного сигнала ЭМП

Для подтверждения адекватности предложенной физико-математической модели ЭМП с пространственно-периодической структурой зондирующего поля в работе разработан первичный преобразователь с параметрами: $W_n = 20$ витков; $W_n = 90$ витков; радиус размещения обмоток $d = 22$ мм; площадь поперечного сечения измерительных обмоток $S = 720$ мм²; длина преобразователя 420 мм; количество ИО равняется 12, которые размещены по окружности через 30 градусов.

Конструктивно такой преобразователь приведен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид ЭМП с исследуемыми образцами

При расчете амплитуды и фазы выходного сигнала для каждой измерительной обмотки преобразователя задавались различными значениями амплитуды и частоты возбуждающего тока. В расчетах и экспериментальных исследованиях намагничивающий ток преобразователя составлял $I = 0,8$ А, частота тока намагничивания $f = 1000$ Гц.

На рис. 4 и рис. 5 приведены расчетные зависимости амплитуды и фазы для первой гармоники выходного сигнала преобразователя с исследуемыми образцами от обобщенного параметра x .

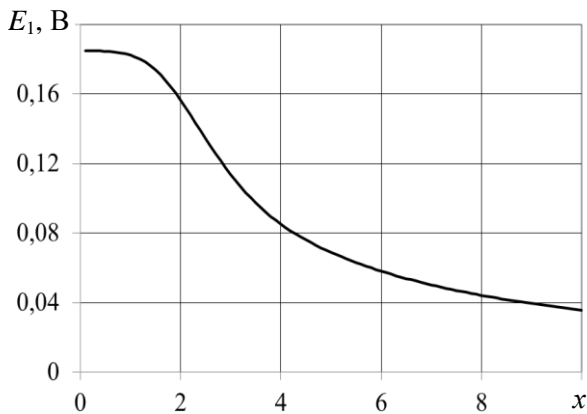


Рис. 4. Зависимость амплитуды 1-й гармоники выходного сигнала ЭМП от параметра x

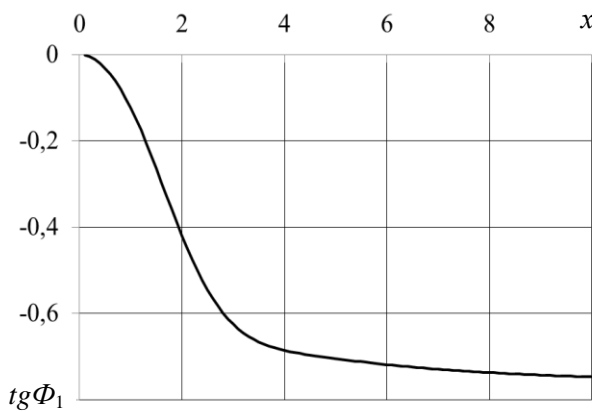


Рис. 5. Зависимость фазового угла 1-й гармоники выходного сигнала ЭМП от параметра x

Экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторной установки, принципиальная электрическая схема которой приведена на рис. 6.

В работе проведены расчеты ожидаемых электрических параметров выходного сигнала разработанного ЭМП без изделия и с исследуемым цилиндрическим образцом длиной 500 мм, диаметром 38 мм.

В таблице 1 приведены результаты полученных расчетных и экспериментальных значений напряжений в ИО преобразователя, расположен-

ных вдоль оси z на поверхности цилиндра с радиусом d и с координатами изменения по углу φ кратными значениям 30-ти градусов.

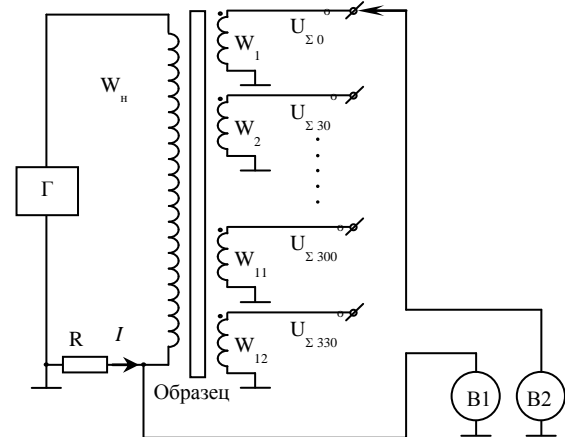


Рис. 6. Схема электрическая принципиальная лабораторной установки

Таблица 1

Результаты расчетных и экспериментальных значений выходных напряжений ЭМП

E_{Σ} , мВ для $I = 0,8$ А и $f = 1000$ Гц				
Угловое положение изм. обмотки, град.	Без образца		40X13	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.
0	134	135,0	148	145,0
30	50,1	51,4	74,1	74,4
60	37,3	37,5	56,2	51,6
90	32,1	33,4	49,3	44,9
120	39,1	39,9	58,1	62,4
150	59,2	59,5	80,1	87,5
180	136	135,8	145	145,7
210	62,5	60,0	112	117,4
240	38,5	37,7	61,4	60,5
270	32,1	31,7	48,3	49,2
300	43,2	44,0	75,2	75,5
330	87,3	88,1	126	122,1

Таблица 1 показывает хорошее совпадение между расчетными значениями ЭДС выходного сигнала ЭМП без исследуемого изделия и при наличии изделия с экспериментально полученными значениями напряжений на выходах измерительных обмоток преобразователя, включенного по схеме рис. 6.

Так, например, для измерительных обмоток, с угловыми координатами $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$ расхождение значений напряжений составило не более 5%, а для обмоток с расположением по $\varphi = 30^\circ, 60^\circ, 300^\circ$ и 330° расхождение составило не более 10%.

Выводы

Таким образом, в данной работе показана возможность создания многопараметровых устройств контроля параметров цилиндрических изделий на основе первичных преобразователей с пространственно-периодическим представлением зондирующего поля.

Предложена физико-математическая модель первичного ЭМП с неоднородным распределением электромагнитного поля проводника с током, расположенного вдоль боковой поверхности цилиндрического изделия, и имеющего трансляционную симметрию вдоль оси z .

Получены выражения для определения амплитуды и фазы для любой пространственной гармоники выходного сигнала ЭМП.

Для подтверждения адекватности предложенной физико-математической модели ЭМП с пространственно-периодической структурой зондирующего поля в работе разработан первичный преобразователь и проведены экспериментальные исследования, которые показали хорошие совпадения между расчетными и экспериментально полученными значениями ЭДС выходного сигнала ЭМП.

Список использованной литературы

1. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль: справочник: Т.3. [Текст] / под ред. В. В. Клюева.– Москва: Машиностроение, 2003.– 588 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля [Текст] / Клюев, В. В., Мужичкий, В. Ф., Горкунов, Э. С., Щербинин, В. Е. – Москва: Машиностроение, 2004. – 832 с.
3. Горкунов, Б. М. Исследование токопроводящих слоистых структур вихретоковым методом [Текст] / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко. // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – №48. – С. 118–121.
4. Шарп, Р. Методы неразрушающих испытаний [Текст] / Р. Шарп. – Москва: Мир, 1972. – 494 с.
5. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – Москва: Гос. издательство физико-математической литературы, 1959.– 532с.
6. Локтионов, Ю. М. Структуры магнитных поверхностей различных систем с пространственно-периодическим магнитным полем [Текст] / Ю. М. Локтионов, В. П. Себко, В. И. Тюпа // Атомная энергия. –1971.–т. 31, вып. 1. –С. 52–53.
7. Морозов, А. И. Геометрия магнитного поля [Текст] / А. И. Морозов, Л. С. Соловьев // Вопросы теории плазмы. – 1963. – № 2. – С. 3–92.
8. Горкунов, Б. М. Многопараметровый электромагнитный контроль токопроводов в пространственно-периодических полях [Текст] / Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко, И. Б. Горкунова // Актуальні проблеми автоматики і приладобудування. – 2014. – С. 39–40.
9. Двайт, Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы [Текст] / Г. Б. Двайт. – Москва: Наука, 1973. – 228 с.
10. Абрмовиц, М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами [Текст] / под ред. М. Абрмовица и М. Стиган. – Москва: Наука. – 1979.
11. Multiparameter electromagnetic sensors for information systems of control and management / Gorkunov B., Tyshchenko A., Gorkunova I., Vu Suan Vuong. // Electrotechnic and computer systems. – 2015. – No. 19 (95). – PP. 129–137.

References

1. Klyuev, V. V. Non-destructive control [Nerazrushayushchiy control] (2003), *Mashinostroenie*, Moscow, Russian Federation, 588p. (in Russian)
2. Klyuev, V. V., Muzhytskyy, V. F., Gorkunov, E. S., and Scherbynyn, V. E. (2004), Non-destructive control: Reference book. Magnetic methods of control [Nerazrushayushchij control: Spravochnik. Magnitnie metodi kontrolya] *Mashinostroenie*, Moscow, Russian Federation, 832p. (in Russian)
3. Gorkunov, B. M., Tupa, I. V., Tyshchenko, A. A. (2011) Research of conductive layered structures by eddy current method [Issledovanie tokoprovodyaschih sloistyih struktur vihretokovym metodom], *Visnik NTU "HPI"*, No 48, Kharkiv, Ukraine, pp. 118–121. (in Russian)
4. Sharp, R., (1972) Methods of non-destructive testing [Metodyi nerazrushayushchih ispytaniy] *Mir*, Moscow, Russian Federation, 494p. (in Russian)
5. Landau, L. D. and Livshits, E. M. (1959), Electrodynamics of continuous environments [Elektrodinamika sploshnyih sred], *Gos. izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury*, Moscow, Russian Federation, 532p. (in Russian)
6. Loktionov, Y. M., (1971) The structure of magnetic surfaces of various systems with spatially periodic magnetic field [Strukturyi magnitnyih poverhnostey razlichnyih sistem s prostranstvenno-periodicheskim magnitnyim polem] *Atomnaya energiya Publ.*, Moscow, Russian Federation, vol. 1, pp. 52–53. (In Russian)
7. Morozov, A. I. (1963), The geometry of the magnetic field [Geometriya magnitnogo polya] *Voprosy teorii plazmy*

prosyi teorii plazmy Publ., Moscow, Russian Federation, vol. 2, pp. 3–92 (In Russian).

8. Gorkunov, B. M., Tyschenko, A. A. Gorkunova, I. B. (2014), Multiparameter electromagnetic control of conductors in the space-periodic fields [Mnogoparametrovyyiy elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvenno-periodicheskikh pol'yah] *Aktualni problemi avtomatiki i priladobuduvannya*, Kharkiv, Ukraine, pp. 39–40. (in Russian)

9. Dwight, G. B. (1973), Tables of integrals and other mathematical formulas [Tablitsyi integralov i drugie matematicheskie formulyi] *Nauka*, Moscow, Russian Federation, 228 p. (In Russian)

10. Abramovits, M., Stigan, M. (1979), Handbook for special functions with formulas, graphs and math tables [Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami] *Nauka*, Moscow, Russian Federation, 832p. (In Russian)

11. Gorkunov, B., Tyshchenko, A., Gorkunova, I. and Vu Suan Vuong. (2015), Multiparameter electromagnetic sensors for information systems of control and management, *Electrotechnic and computer systems*, Kharkiv, Ukraine, no. 19(95), pp. 129–137.

MULTI-PARAMETER ELECTROMAGNETIC CONVERTER FOR CONTROL AND DIAGNOSTIC SYSTEMS

B. M. Gorkunov, S. G. Lvov, N. N. Sirenko, Shaiban Tamer
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Abstract. *The work presents the scientific and technical results of the study of the electromagnetic multi-parameter transducer for the cylindrical metal products parameters determining, which principle is based on the allocation of the amplitude and phase of the spatial harmonics of a nonuniform magnetic field presented in the form of a Fourier series.*

The physic-mathematical model of an electromagnetic transducer with non-uniform distribution of an electromagnetic field for a conductor with a current located along the lateral surface of a cylindrical product at a distance d from the center of a metallic cylinder of radius a . The spatial problem of the distribution of a magnetic field variable in time is solved and expressions allowing calculating the functions for any spatial harmonic are obtained and it is possible to make a picture of the distribution of the field in any area (inside the product, between the product and conductor with current, as well as beyond this conductor).

Mathematical expressions are obtained to determine amplitude and phase of transducer's signal n -th spatial harmonics, which are generated in the measuring windings located along the surface of the cylindrical object with the angular coordinate φ on a circle of radius d . Experiments have been carried out to confirm the adequacy of the transducer's proposed model, which showed the difference between the calculated and experimentally obtained values of the EMF of the transducer output signal.

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

БАГАТОПАРАМЕТРОВИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ

Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, М. М. Сіренко, Шібан Тамер
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. *В роботі запропоновано фізико-математичну модель первинного трансформаторного електромагнітного перетворювача з неоднорідним розподілом зондуючого магнітного поля, створеного нескінченно довгим лінійним провідником із струмом, розміщеним вздовж бокової поверхні циліндричного виробу і який має трансляційну симетрію вздовж цієї поверхні. Присутність трансляційної симетрії поля дає можливість використовувати достатньо вузькі рамкові вимірювальні обмотки, які розміщені з кутовими координатами вздовж контрольованого виробу паралельно намагнічувальним обмоткам. Обмотки можуть пронизувати як радіальні так і тангенціальні складові напруженості магнітного поля. В першому випадку площина вимірювальної обмотки повинна бути перпендикулярна до радіуса виробу, а в другому випадку перпендикулярна до поверхні виробу. Отримано співвідношення, що описують роботу багатопараметрового електромагнітного перетворювача.*

ча з просторово-періодичною структурою поля. Розроблено трансформаторний перетворювач і проведено порівняльний аналіз отриманих результатів контролю електричних, магнітних і геометричних параметрів досліджуваних виробів розробленим методом з розрахунковими значеннями. Отримані формули для визначення амплітуди і фази для будь якої просторової гармоніки вихідного сигналу електромагнітного перетворювача.

Для підтвердження адекватності запропонованої моделі електромагнітного перетворювача з просторово-періодичною структурою магнітного поля в роботі проведені експериментальні дослідження які підтвердили теоретичні розрахунки для амплітуди і фази сигналу перетворювача. Так, для вимірювальних обмоток, з кутовими координатами $\varphi = 0^\circ$ і $\varphi = 180^\circ$ різниця в значеннях напруги склала не більше 5%, а для обмоток з координатами для $\varphi = 30^\circ, 60^\circ, 300^\circ$ і 330° різниця склала не більше 10%.

Ключові слова: просторово-періодичне поле, електромагнітний перетворювач, магнітна проникність, титома електрична провідність.

Получено 21.02.2019



Горкунов Борис Митрофанович, доктор технических наук, профессор кафедры информационно-измерительных технологий и систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua, тел.: +38 050 2813879

Gorkunov Boris, ScD., professor of the Department «Information and measuring technologies and system» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kurpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua, тел.: +38 050 2813879

ORCID ID: 0000-0002-8175-858X



Львов Сергей Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительных технологий и систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина. E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua, тел.: +38 095 3939400

Lvov Sergey, PhD., associate professor of the Department «Information and measuring technologies and system» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kurpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine. E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua, тел.: +38 095 3939400

ORCID ID: 0000-0003-3830-0570



Сиренко Николай Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры приборов и методов неразрушающего контроля Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина. E-mail: sirnn2@gmail.com, тел.: +38(057)7076934

Sirenko Nicholay, PhD., professor of the Department «Equipment and systems of the nondestructive inspection» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kurpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine. E-mail: sirnn2@gmail.com, тел.: +38(057)7076934

ORCID ID: 0000-0002-5052-2750



Шибан Тамер, аспирант кафедры информационно-измерительных технологий и систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина
E-mail: tamers@i.ua, тел.: +38(057)7076934

Shaiban Tamer, postgraduate of the Department «Information and measuring technologies and system» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kurpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine. E-mail: tamers@i.ua, тел.: +38(057)7076934

ORCID ID: 0000-0003-1819-4977