



# Нормированные функции вихретоковых измерительных преобразователей с пространственно-периодической структурой поля при многопараметровом контроле металлических изделий

Б.М. Горкунов, С.Г. Львов, Е.А. Борисенко, Тамер Шибан

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ул. Кирпичева, 2, 61002, Харьков, Украина  
4borisea@gmail.com

## Аннотация

Рассматривается задача многопараметрового контроля металлических изделий при осуществлении их структурокопии. Показано, что вихретоковый измерительный преобразователь с пространственно-периодической структурой электромагнитного поля выгодно отличается от других методов широкой областью применения, простотой и обеспечиваемой достоверностью контроля. Большой интерес с практической и теоретической точки зрения представляет решение обратной задачи вихретокового контроля, а именно по реакции на появление в поле некоторого объекта определить параметры этого объекта. Рассмотрена модель электромагнитного поля такого преобразователя с металлическим объектом с контролируемыми параметрами удельной проводимости, магнитной проницаемости и диаметра. Теоретически обосновано, что при определенном подходе к взаимному расположению обмотки возбуждения и измерительных обмоток в выходном сигнале преобразователя можно выделить сигнал, пропорциональный амплитуде и фазе первой и третьей гармоник поля. Приведены аналитические соотношения, позволяющие получить зависимости коэффициентов преобразования для амплитуд и фаз гармоник, а также их чувствительностей от обобщенной функции, аргументами которой являются частота поля и параметры образца. Сделан вывод о том, что в зависимости от параметров исследуемого образца существует некий рациональный режим работы преобразователя, обеспечивающий наивысшую чувствительность по выходным параметрам и наилучшую достоверность контроля.

**Ключевые слова:** электромагнитный преобразователь, пространственно-периодическая структура электромагнитного поля, электропроводность, магнитная проницаемость.

Получено: 23.07.2018

Отредактировано: 27.08.2018

Одобрено к печати: 31.08.2018

## Постановка проблемы

Вихретоковые измерительные преобразователи широко применяются при решении задач неразрушающего контроля (НК), в частности в дефекто- и структурокопии. В основу вихретокового метода НК положен анализ электромагнитного поля, создаваемого вихревыми токами, протекающими в контролируемом металлическом объекте. Физически вихретоковый преобразователь (ВТП) представляет собой генераторный датчик трансформаторного типа с одной обмоткой возбуждения и несколькими измерительными обмотками. Особенностью вихретокового метода является возможность его применения при многопараметровом контроле, а именно такой подход зачастую является единственным, который может обнаружить напряженно-деформированное состояние либо идентифицировать тип материала ис-

следуемого металлического объекта. В качестве параметров контролируемого объекта принимают его удельную проводимость  $\sigma$ , магнитную проницаемость  $\mu$  и радиус изделия  $d$ . Также контролю может подлежать состояние структуры материала объекта при исследовании механических напряжений и деформаций.

## Анализ состояния проблемы

Среди конкурирующих методов многопараметрового НК можно перечислить электропотенциальный, вихретокомагнитный и многочастотный вихретоковый [1]. Электропотенциальный метод осложнен необходимостью воздействия значительными токами (до десятков кА). Вихретокомагнитный требует достаточно точной подстройки тока подмагничивания для работы с конкретным материа-

лом [2]. При многочастотном вихретоковом методе следует учитывать то, что при изменении частоты максимальная плотность тока будет смещаться в другой слой, где в силу структурной неоднородности свойства материала могут отличаться; также существенным может оказаться влияние скин-эффекта на результат измерения диаметра изделия за счет влияния шероховатости [3, 4]. Кроме всего, перечисленные методы применимы в основном при дефектоскопии и, как правило, не способны решать задачи структуроскопии. Решение задач дефектоскопии в некотором роде проще определения состава и структуры материала при структуроскопии, поскольку появление дефекта приводит к резкому изменению выходного сигнала преобразователя при его размещении в зоне проявления дефекта [3].

### Цель статьи

Таким образом, универсальность метода вихретокового контроля обуславливает необходимость проработки математического описания картины электромагнитного поля, возникающего в системе “вихретоковый преобразователь — исследуемый объект”. Наличие такой модели и полученных нормированных функций преобразования способствует решению задачи идентификации неизвестного объекта по реакции на его появление электромагнитного поля.

Идентификацию ферромагнитного материала, из которого изготовлен исследуемый металлический образец, возможно осуществлять по таким характерным признакам, как магнитная проницаемость  $\mu$  и удельная проводимость  $\sigma$  с учетом геометрического параметра. Кроме того, влияющими величинами являются анизотропия материала и структура кристаллической решетки материала, на которые могут оказывать влияние внутренние напряжения, возникающие в процессе отливки и механической обработки образца. При таких исходных данных следует говорить о решении задачи многопараметрового контроля. При этом очевидно, что чем больше информативных параметров подлежат контролю, тем больше измеренных параметров следует выделить в выходном сигнале.

При решении задач многопараметрового контроля для расширения количества контролируемых параметров изделия удобно применить модель пространственно-периодической структуры поля [5]. Имея такую модель, измерительные обмотки можно разместить таким образом, чтобы возможно было получать информацию о параметрах нескольких пространственных гармоник. При этом амплитуда и фаза каждой пространственной гармоники являются, в общем случае, независимыми информативными параметрами. Алгоритм определения параметров пространственных гармоник поля в системе состоит в следующем [6].

### Основной материал

Пусть имеется ферромагнитный цилиндр радиуса  $a$ , который находится в электромагнитном поле, создаваемом проводником с током, расположенным от образца на расстоянии  $d$  (рис. 1). Продольные оси проводника и образца параллельны. По проводнику в направлении, совпадающем с положительным направлением оси  $z$ , протекает синусоидальный ток плотностью  $J$ .

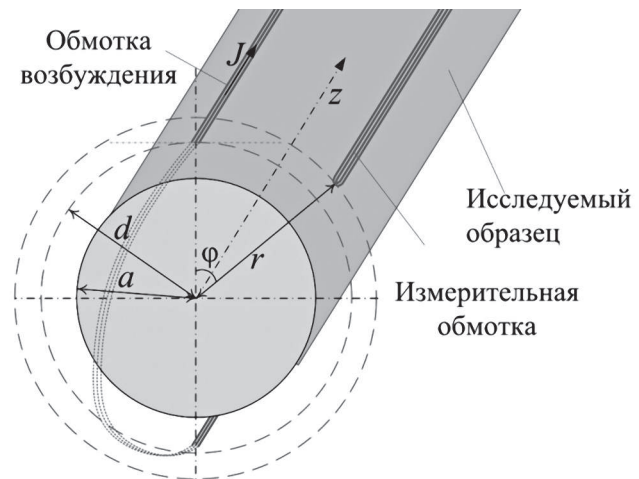


Рис. 1. Взаимное расположение исследуемого образца и обмоток возбуждения и измерения

Для такой пространственной модели в [7] были получены выражения для  $r$ -й и  $\phi$ -й компоненты напряженности магнитного поля внутри и вне цилиндрического изделия, позволяющие представить его составляющие в виде рядов по пространственным гармоникам с учетом угловой полуширины полюса (обмотки с током)  $\gamma$ :

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

$$H_\phi(r, \phi, t) = e^{i\omega t} j \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} g_n(r) \cos(n\phi), \quad (1)$$

где  $n$  — номер пространственной гармоники;  $f_n(r)$ ,  $g_n(r)$  — функции, определяющие реакцию электромагнитного поля на ферромагнитное изделие;  $\omega$  — циклическая частота тока возбуждения.

За счет того, что обмотка возбуждения, опоясывающая образец вдоль, имеет части (рис. 1), по которым протекают одинаковые встречные токи  $J$ , в результирующей картине поля будут отсутствовать четные гармоники [7]. Графическое представление пространственных гармоник, составляющих неоднородность поверхности поля на расстоянии от оси  $z_c$  радиуса  $d$ , представлено на рис. 2.

При размещении измерительной обмотки в точке с координатами  $(r, \phi)$  на расстоянии  $r = a$  наводимая ЭДС в этой обмотке магнитным потоком, пронизывающим изделие, определена в [7]. Система уравнений (1) имеет решения для функций  $f_n$  и  $g_n$ , которые после выделения действительной

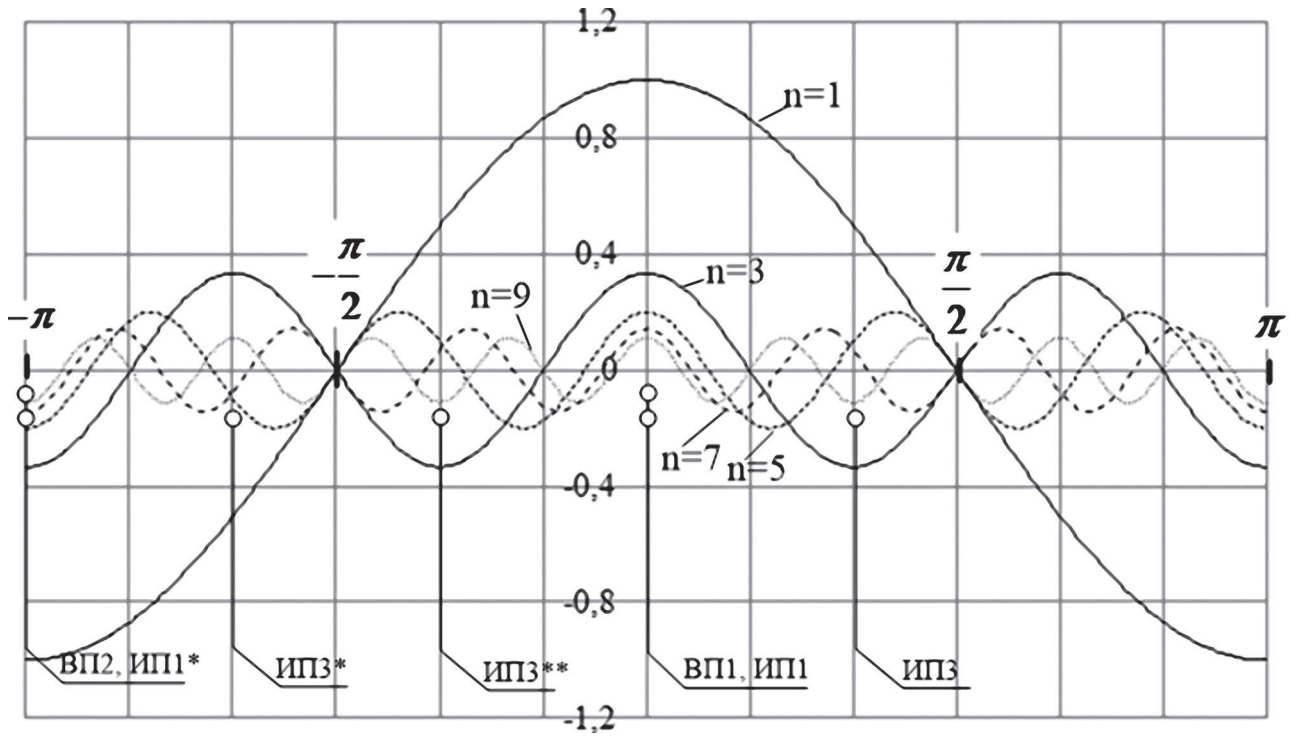


Рис. 2. Распределение пространственных гармоник поля вихрекового преобразователя без исследуемого образца (на воздухе)

и мнимой части функций Бесселя, с помощью функций Кельвина *ber* и *bei* [8], позволяют получить выражения для амплитуд и фаз  $n$ -й пространственной гармоники. Схема включения обмоток для выделения амплитуд и фаз первой и третьей гармоник представлена на рис. 3.

На рис. 3 вольтметры В1 и В3 служат для измерения амплитуд первой и третьей гармоник соответственно; фазометры Ф1 и Ф3 — для фаз указанных гармоник, причем на рис. 2 показано геометрическое место расположения возбуждающих (ВП) и измерительных (ИП) проводников по угловой координате  $\varphi$ .

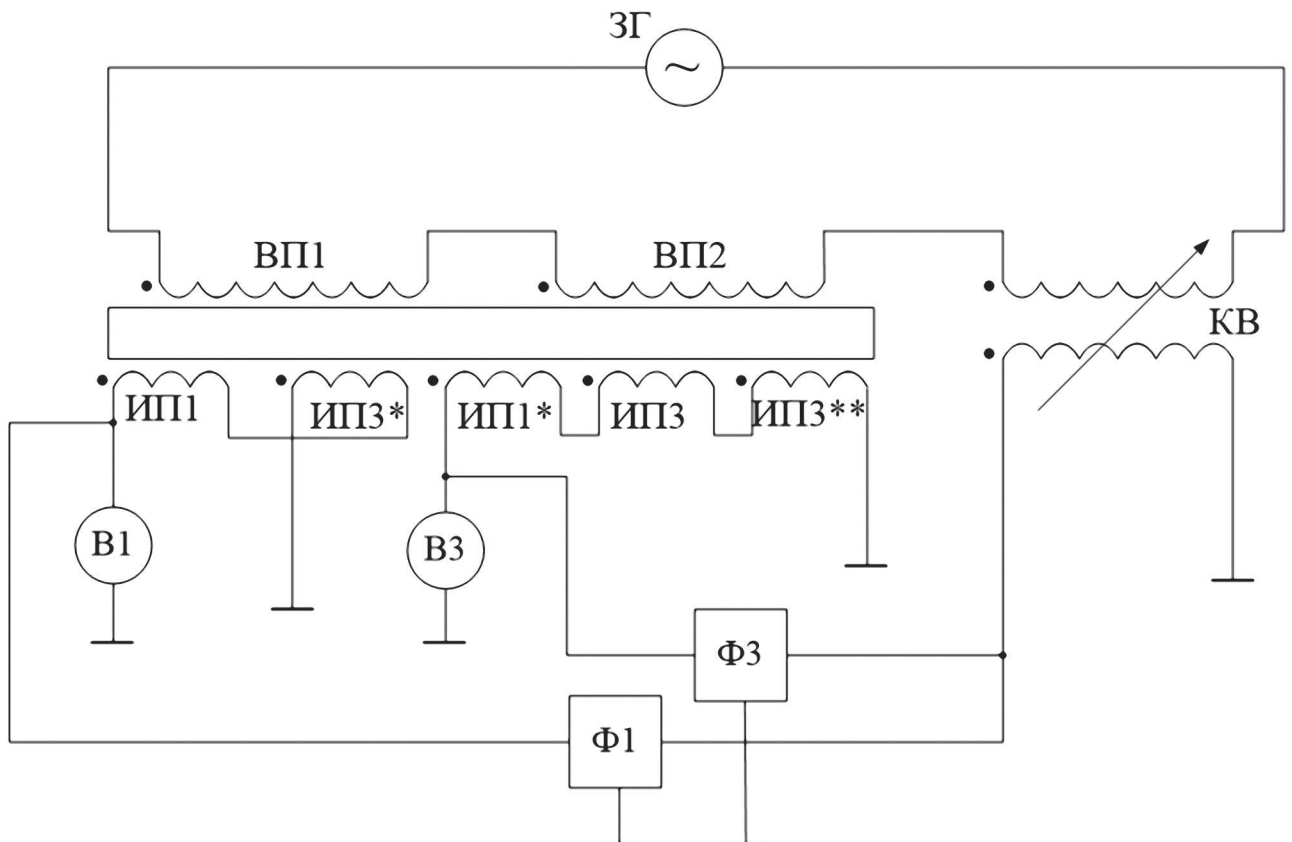


Рис. 3. Схема включения обмоток для выделения 1-й и 3-й гармоник: В1, В3 — вольтметры; Ф1, Ф3 — фазометры; 3Г — задающий генератор; КВ — катушка взаимной индуктивности

Для практического применения предложенного метода целесообразно осуществить нормировку выражений для ЭДС в случае наличия контролируемого изделия  $E_n$  к ЭДС при отсутствии контролируемого изделия  $E_{n0}$ . В результате выражения для нормированной амплитуды  $n$ -й пространственной гармоники:

$$A_n = \frac{E_n}{E_{n0}} = \left(\frac{a}{d}\right)^n \sqrt{(\operatorname{Re}(f_n))^2 + (\operatorname{Im}(f_n))^2} \quad (2)$$

и ее фаза

$$\operatorname{tg}(\Phi_n) = \frac{\operatorname{Im}(f_n)}{\operatorname{Re}(f_n)}, \quad (3)$$

где

$$\operatorname{Re} f_n = \frac{a_n^{(+)}(\mu a_n^{(+)} + a_n^{(-)}) + b_n^{(+)}(\mu b_n^{(+)} + b_n^{(-)})}{(\mu a_n^{(+)} + a_n^{(-)})^2 + (\mu b_n^{(+)} + b_n^{(-)})^2}$$

$$\operatorname{Im} f_n = \frac{-a_n^{(+)}(\mu b_n^{(+)} + b_n^{(-)}) + b_n^{(+)}(\mu a_n^{(+)} + a_n^{(-)})}{(\mu a_n^{(+)} + a_n^{(-)})^2 + (\mu b_n^{(+)} + b_n^{(-)})^2}$$

$$a_n^{(+)} = \operatorname{ber}_{n-1}x + \operatorname{ber}_{n+1}x; \quad a_n^{(-)} = \operatorname{ber}_{n-1}x - \operatorname{ber}_{n+1}x;$$

$$b_n^{(+)} = \operatorname{bei}_{n-1}x + \operatorname{bei}_{n+1}x; \quad b_n^{(-)} = \operatorname{bei}_{n-1}x - \operatorname{bei}_{n+1}x.$$

При составлении данных выражений была введена переменная  $x$ , которая является функцией исходных величин  $x = a\sqrt{\mu_0\mu\sigma\omega}$ . Нормировка амплитуды позволяет обеспечить нечувствительность к искажению формы поля, которое может возникнуть:

- из-за наличия в поле посторонних конструктивных элементов, не относящихся напрямую к системе “возбуждающая обмотка — измерительная обмотка — исследуемый образец”;

- из-за несоосности исследуемого образца и продольной оси цилиндра, на образующих которого расположены обмотки;

- по прочим причинам, приводящим к отличию действительного и предполагаемого расположения в пространстве обмоток и исследуемого образца.

На рис. 4–5 показано поведение нормированных функций преобразования по амплитуде и фазе от обобщенного параметра  $x$ , полученных расчетным путем по (2), (3), а также чувствительности этих параметров для первой и третьей гармоник [9]. Аналогичным способом можно получить зависимости для других нечетных пространственных гармоник.

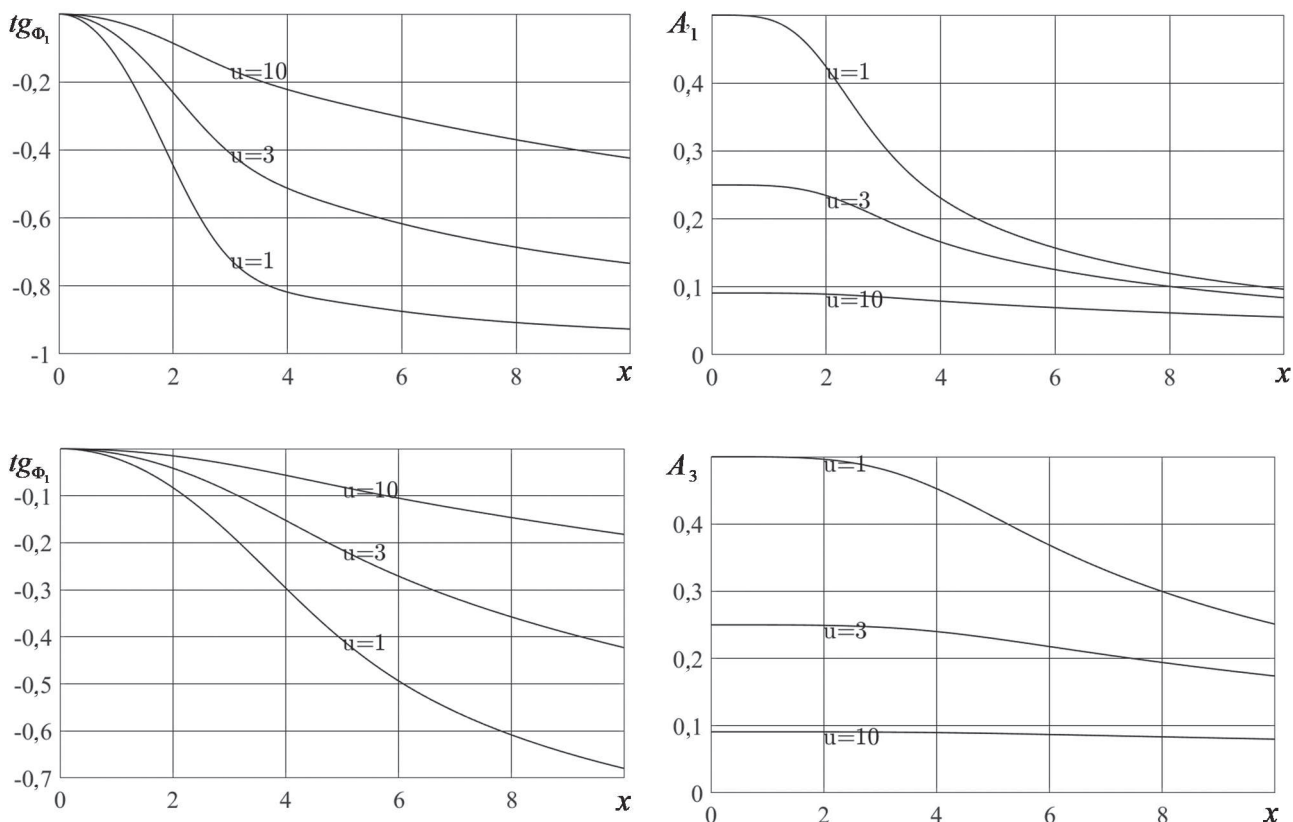


Рис. 4. Функции преобразования  $\operatorname{tg}\phi_1 = f(x)$ ,  $\operatorname{tg}\phi_3 = f(x)$ ,  $A_1 = f(x)$  и  $A_3 = f(x)$

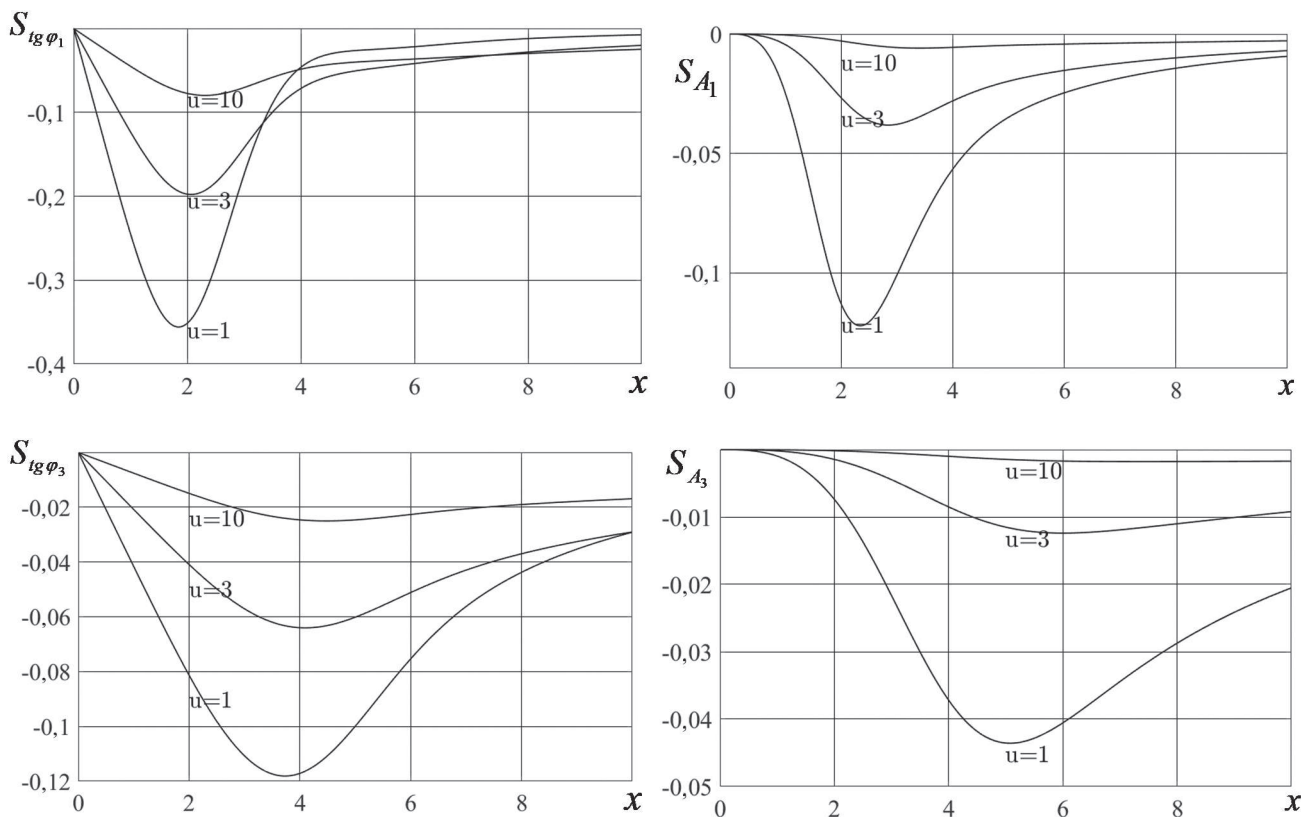


Рис. 5. Чувствительность по функциям преобразования

$$S_{tg\varphi_1} = \frac{dtg\varphi_1}{dx} = f(x), S_{tg\varphi_3} = \frac{dtg\varphi_3}{dx} = f(x), S_{A_1} = \frac{dA_1}{dx} = f(x) \text{ и } S_{A_3} = \frac{dA_3}{dx} = f(x)$$

## Выводы

Таким образом, анализируя поведение чувствительностей по амплитуде и фазе для первой и третьей гармоник, можно выделить рациональный режим работы преобразователя при исследовании металлических изделий с различными электромагнитными и геометрическими параметрами, причем выбор рационального режима

осуществляется подбором частоты зондирующего поля. Решение данной задачи позволяет точнее подобрать необходимую измерительную аппаратуру для реализации многопараметрового вихрекового метода контроля с использованием первичных преобразователей с пространственно-периодической структурой зондирующего поля.

# Нормовані функції вихорострумівих вимірювальних перетворювачів із просторово-періодичною структурою поля при багатопараметровому контролі металевих виробів

Б.М. Горкунов, С.Г. Львов, Є.А. Борисенко, Тамер Шибан

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна  
4borisea@gmail.com

## Анотація

Розглянуто задачу багатопараметрового контролю металевих виробів під час здійснення структуроскопії металевих виробів. Показано, що вихорострумівих вимірювальний перетворювач із просторово-періодичною структурою електромагнітного поля вигідно відрізняється від інших методів неруйнівного контролю широкого



сферою застосування, простотою і забезпечуваною достовірністю контролю. Великий інтерес з практичної і теоретичної точки зору є рішення зворотної задачі вихрострумowego контролю, а саме, за реакцією на появу у полі деякого об'єкта – визначити параметри цього об'єкта. Розглянуто модель електромагнітного поля такого перетворювача із металевим об'єктом з контрольованими параметрами питомої провідності, магнітної проникності та діаметра. Теоретично обґрунтовано, що при певному підході до взаємного розташування обмотки збудження і вимірювальних обмоток, і при підключенні за запропонованою схемою вольтметра і фазометра у вихідному сигналі перетворювача, можна виділити сигнал, пропорційний амплітуді і фазі першої та третьої гармонік поля. Наведено аналітичні співвідношення, що дозволяють одержати залежності коефіцієнтів перетворення для амплітуд і фаз гармонік, а також їх чутливостей від узагальненої функції, аргументами якої є частота поля та параметри зразка. Зроблено висновок про те, що можна виділити раціональний режим роботи розглянутого перетворювача під час дослідження металевих виробів з різними електромагнітними і геометричними параметрами, причому вибір раціонального режиму здійснюється підбором частоти зонduючого поля. Рішення такого завдання дозволить точніше підібрати необхідну вимірювальну апаратуру для реалізації багатопараметрового вихрострумowego методу контролю із використанням первинних перетворювачів з просторово-періодичною структурою зонduючого поля.

**Ключові слова:** електромагнітний перетворювач, просторово-періодична структура електромагнітного поля, електропровідність, магнітна проникність.

## **Normalized functions of eddy current measuring transducers with spatially periodic field structure for multiparameter control of metal products**

**B.M. Horkunov, S.H. Lvov, Ye.A. Borysenko, Tamer Shaiban**

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpycheva st. 2, 61002, Kharkov, Ukraine*

*4borisea@gmail.com*

### **Abstract**

The article deals with the problem of multiparameter control of metal products in the scope of their structurescopy. It is shown that an eddy current measuring transducer with a spatially periodic structure of the electromagnetic field favorably differs from other methods by a wide range of application, simplicity and provided reliability of control. The solution of the inverse problem of eddy current control is of a great interest from the practical and theoretical point of view, namely, the determination of the parameters of the object by the reaction to its appear in the electromagnetic field. The electromagnetic field model of such a transducer with a metal object with controlled parameters of conductivity, magnetic permeability and diameter is considered. It is theoretically grounded that with a certain approach to the mutual arrangement of the excitation and measuring windings, and by connecting the voltmeter and phase meter according to the proposed scheme, a signal proportional to the amplitude and phase of the first and third field harmonics can be obtained in the output signal of the transducer. The analytical relations are given that allow to obtain dependences of the conversion factors for the amplitudes and phases of the harmonics, as well as their sensitivities on the generalized function, the arguments of which are the field frequency and the parameters of the sample. The conclusion is made that it is possible to single out a rational operating mode of the eddy current transducer used in the testing of metal products with various electromagnetic and geometrical parameters, the selection of a rational mode being carried out by selecting the frequency of the excitation field and that the solution of such a problem will make it possible to more accurately select the necessary measuring equipment for the realization of the multi- parametric eddy current testing method with the use of primary transducers with a spatially periodic structure of the excitation field.

**Keywords:** electromagnetic transducer, spatially periodic structure of electromagnetic field, conductivity, magnetic permeability.

### Список литературы

1. Клюев В. В. и др. Измерения, контроль, испытания и диагностика. Москва: Машиностроение, 1996. 464 с.
2. Сухоруков В. В. Неразрушающий контроль. Кн. 3. Электромагнитный контроль. Москва: Высшая школа, 1992. 312 с.
3. Неразрушающий контроль: Клюева В. В. (ред.). Справочник: Т. 2, в 2-х кн. Москва: Машиностроение, 2003. 688 с.
4. Oral Büyüköztürk, Mehmet Ali Taşdemir. Non-destructive Testing of Materials and Structures. Vol. 6 of RILEM Bookseries, 2012. 1278 p. doi: 10.1007/978-94-007-0723-8.
5. Горкунов Б. М., Тюпа И. В. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий. Вестник НТУ "ХПИ". 2004. № 5. С. 93–99.
6. Горкунов Б. М., Романов С. С., Себко В. П. А. С. 1287067 (СССР). Способ бесконтактного измерения параметров цилиндрических проводящих изделий. Оpubл. в Б.И. 1987. № 4.
7. Горкунов Б. М., Тищенко А. А., Горкунова И. Б. Многопараметровый электромагнитный контроль токопроводов в пространственно-периодических полях. Актуальні проблеми автоматики і приладобудування. Харьков: НТУ "ХПИ". 2014. С. 39–40.
8. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами: Абрмовица М., Стиган И. (ред.). Москва: Наука, 1979. 832 с.
9. Чинков В. М. Основы метрології та вимірювальної техніки. Навч. посібн.: 2-ге вид., перероб. і доп. Харків: НТУ "ХПИ", 2005. 524 с.
2. Suhorukov V.V. Nerazrushayuschiy kontrol'. Кн. 3: Elektromagnitnyiy kontrol' [Non-destructive testing. Vol. 3: Electromagnetic testing]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1992. 312 p.
3. Klyuev V.V. (Ed.). Nerazrushayuschiy kontrol': spravochnik [Non-destructive testing. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, vol. 2. 688 p. (in Russian).
4. Oral Büyüköztürk, Mehmet Ali Taşdemir. Non-destructive Testing of Materials and Structures. Of RILEM Bookseries, 2012, vol. 6. 1278 p. doi: 10.1007/978-94-007-0723-8.
5. Gorkunov B.M., Tyupa I.V. Vihretokovyyi dvuhparametrovyyi kontrol' ferromagnitnyih tsilindricheskih izdeliy [Eddy-current two-parameter testing of ferromagnetic cylindrical bodies]. *Vesnik NTU KhPI*. Kharkov, 2004, no. 5, pp. 93–99 (in Russian).
6. Gorkunov B.M., Romanov S.S., Sebko V.P. Sposob beskontaktnogo izmereniya parametrov tsilindricheskih provodyaschih izdeliy [A Method of Non-contact Measurement of Parameters of Cylindrical Conductive Products]. Moscow, Russian Federation, A.S. 1287067 (USSR), 1987, no. 4 (in Russian).
7. Gorkunov B.M., Tischenko A.A., Gorkunova I.B. Mnogoparametrovyyi elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvenno-periodicheskih polyah [Multiparameter Electromagnetic Control Conductors in a Spatially Periodic Fields]. *Aktualni Problemi Avtomatiki I Priladobuduvannya Publ.*, Kharkov, Ukraine, 2014, pp. 39–40 (in Russian).
8. Abrmovitsa M., Stigan I. (Eds.). Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami [Handbook for special functions with formulas, graphs and math tables]. Moscow, Nauka, 1979. 832 p. (in Russian).
9. Chynkov V.M. (Ed.) Osnovy metrolohii ta vymiriuvальної техніки [Fundamentals of metrology and measurement technology]. Kharkiv, NTU KhPI Publ., 2005. 524 p. (in Ukrainian).

### References

1. Klyuev V.V. et al. *Izmereniya, kontrol', ispyitaniya i diagnostika* [Measurement, control, testing and diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996. 464 p.
2. Suhorukov V.V. (Ed.). *Nerazrushayuschiy kontrol': spravochnik* [Non-destructive testing. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, vol. 2. 688 p. (in Russian).
3. Oral Büyüköztürk, Mehmet Ali Taşdemir. *Non-destructive Testing of Materials and Structures*. Of RILEM Bookseries, 2012, vol. 6. 1278 p. doi: 10.1007/978-94-007-0723-8.
4. Gorkunov B.M., Tyupa I.V. *Vihretokovyyi dvuhparametrovyyi kontrol' ferromagnitnyih tsilindricheskih izdeliy* [Eddy-current two-parameter testing of ferromagnetic cylindrical bodies]. *Vesnik NTU KhPI*. Kharkov, 2004, no. 5, pp. 93–99 (in Russian).
5. Gorkunov B.M., Romanov S.S., Sebko V.P. *Sposob beskontaktnogo izmereniya parametrov tsilindricheskih provodyaschih izdeliy* [A Method of Non-contact Measurement of Parameters of Cylindrical Conductive Products]. Moscow, Russian Federation, A.S. 1287067 (USSR), 1987, no. 4 (in Russian).
6. Gorkunov B.M., Tischenko A.A., Gorkunova I.B. *Mnogoparametrovyyi elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvenno-periodicheskih polyah* [Multiparameter Electromagnetic Control Conductors in a Spatially Periodic Fields]. *Aktualni Problemi Avtomatiki I Priladobuduvannya Publ.*, Kharkov, Ukraine, 2014, pp. 39–40 (in Russian).
7. Abrmovitsa M., Stigan I. (Eds.). *Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook for special functions with formulas, graphs and math tables]. Moscow, Nauka, 1979. 832 p. (in Russian).
8. Chynkov V.M. (Ed.) *Osnovy metrolohii ta vymiriuvальної техніки* [Fundamentals of metrology and measurement technology]. Kharkiv, NTU KhPI Publ., 2005. 524 p. (in Ukrainian).