

УДК 620.179.14

**Б. М. ГОРКУНОВ, А. А. ТИЩЕНКО, ШИБАН ТАМЕР****ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

В работе рассмотрены вопросы построения многопараметровых электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями. Приведены конструкции электромагнитных преобразователей с одним и двумя возбуждающими полюсами для выделения определенных преобладающих пространственных гармоник. Представлены принципиальные схемы включения преобразователей, реализующих трехпараметровый метод контроля параметров изделий. Сделан вывод о возможности использования электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями для многопараметровых измерений.

**Ключевые слова:** многопараметровые измерения, электромагнитный преобразователь, пространственно-периодическое поле.

**Введение.** Современные информационно-измерительные системы (ИИС) повсеместно внедряются в различных отраслях промышленности и энергетики [1]. Основными элементами ИИС являются первичные преобразователи (датчики) и устройства обработки информации. Если рассматривать устройства обработки информации, то все они сейчас строятся с применением микроконтроллеров и в этом плане достигли значительных успехов в достаточно точной обработке информации с последующим ее отображением, хранением и документированием. Что касается датчиков, то на современном этапе актуальным является вопрос разработки многопараметровых, многофункциональных первичных преобразователях физических величин.

В этом плане перспективными являются электромагнитные первичные преобразователи (ЭМП), выходными сигналами которых являются амплитуда и фаза или активное сопротивление и индуктивность. Такие датчики получили название двухпараметровые [2, 3].

Дальнейшее увеличение информационных параметров ЭМП может осуществляться несколькими путями. Возможно питание ЭМП напряжениями с различными частотами с последующей фильтрацией и выделением амплитуды и фазы на каждой частоте. Такая реализация многопараметровых датчиков достаточно сложная и не всегда отображает истинную картину происходящих процессов в объекте контроля из-за различной глубины проникновения поля (скин эффект). Разновидностью данного метода является возможность подачи импульсного напряжения на возбуждающую обмотку ЭМП, но дальнейшая обработка выходного сигнала громоздка и аналогична предыдущему методу.

**Цель статьи.** Цель данной работы заключается в рассмотрении нового перспективного метода и устройства многопараметрового ЭМП с пространственно-периодическим полем.

**Основная часть.** Сочетание различных возбуждающих полюсов и проводящего изделия образует дроссельный (параметрический) преобразователь [4]. Однако использование его в практике измерений затруднено в связи с тем, что сигналы, снимаемые с единственной обмотки преобразователя, включают в себя большое число

слабозатухающих пространственных гармоник поля. Кроме того, параметрические электромагнитные преобразователи имеют достаточно большие погрешности измерения из-за влияния температуры на величину активного сопротивления обмотки, которое является информативным параметром и участвует в определении информационных характеристик объекта контроля. Поэтому, при создании устройств с пространственно-периодическими полями целесообразно использовать трансформаторные преобразователи, которые дают возможность выделить несколько первых преобладающих гармоник, поскольку остальные затухают. При этом наличие трансляционной симметрии поля дает возможность использовать достаточно узкие петлевые измерительные обмотки, расположенные вдоль изделия параллельно возбуждающим проводникам.

С целью проведения многопараметровых измерений удобно пользоваться нормированной вносимой  $r$ -й составляющей магнитного потока (или вносимой составляющей ЭДС)  $n$ -й пространственной гармоники. В работе [5] приведены выражения для модуля и фазы такой компоненты потока.

Как описывалось ранее, для определения трех параметров изделия: радиуса, относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости ( $a$ ,  $\mu_r$  и  $\sigma$ ) нужно использовать две какие-либо пространственные гармоники поля. С точки зрения достижения высокой чувствительности и точности измерений в намагничивающей системе с одним возбуждающим полюсом лучше выделять 1-ю и 2-ю гармоники [5].

Конструкция электромагнитного преобразователя для выделения 1-й и 2-й преобладающих пространственных гармоник показана на рис. 1. Здесь ВП – возбуждающий полюс; ИС<sub>1</sub>, ИС<sub>2</sub> и ИС<sub>2</sub>\* – секции рамочных измерительных обмоток. Возбуждающий полюс и указанные секции располагаются в пазах диэлектрических опорных колец ОК. Преобразователь имеет технологическое окно, через которое можно устанавливать внутри рабочего объема цилиндрические изделия, у которых нет свободного доступа к их концам.

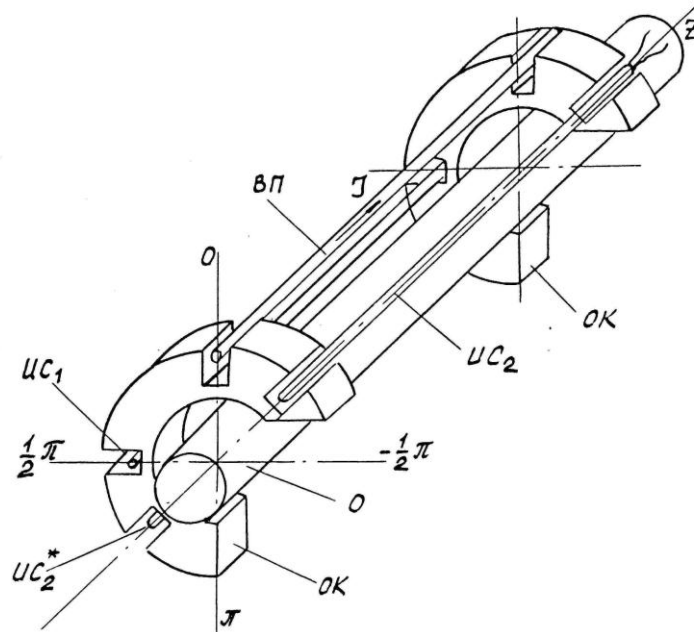


Рис. 1. – Электромагнитный преобразователь с одним возбуждающим полюсом и секциями измерительной обмотки

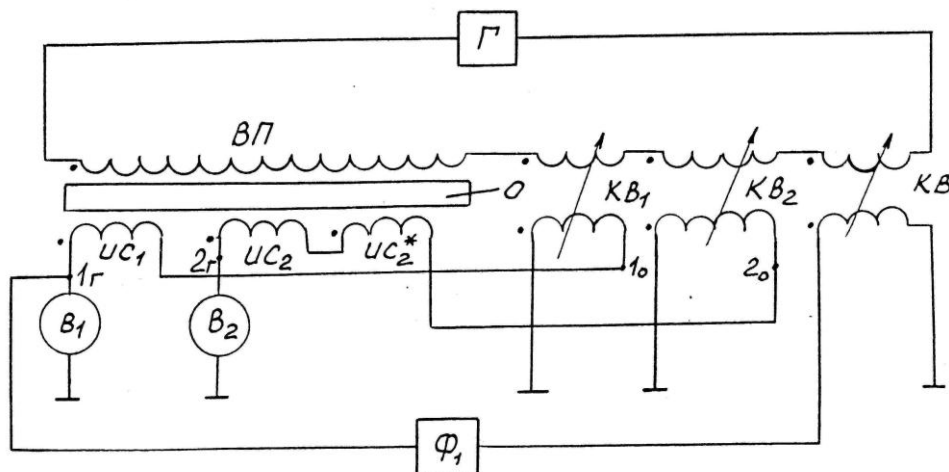


Рис. 2. – Электрическая схема включения электромагнитного преобразователя с одним возбуждающим полюсом

На рис. 2. представлена принципиальная схема включения обмоток преобразователя, реализующего трехпараметровый метод на основе выделения 1-й и 2-й пространственных гармоник поля. Схема содержит генератор  $\Gamma$ , три катушки переменных взаимных индуктивностей  $KB$ ,  $KB_1$  и  $KB_2$ , вольтметры  $B_1$ ,  $B_2$ , фазометр  $\Phi_1$ . Секции  $ИС_2$  и  $ИС_2^*$  соединены последовательно-согласно.

Секция  $ИС_1$  включена последовательно-согласно с вторичной обмоткой  $KB_1$ , а секции  $ИС_2$  и  $ИС_2^*$  соединены также последовательно-встречно с вторичной обмоткой  $KB_2$ . Вольтметры  $B_1$  и  $B_2$  измеряют  $r$ -е составляющие вносимых ЭДС 1-й и 2-й гармоник поля соответственно при наличии в преобразователе исследуемого образца  $O$ .

Сигналы, пропорциональные этим ЭДС, снимаются с зажимов  $1Г$  и  $2Г$  (см. рис. 2). При заданных значениях намагничивающего тока в  $ВП$ ,

радиуса измерительной обмотки, частоты питания, площади рамки измерительной обмотки величины тех же составляющих ЭДС 1-й и 2-й гармоник поля преобразователя без изделия являются постоянными и известными. Эти ЭДС измеряют на зажимах  $1_0$  и  $2_0$  катушек взаимной индуктивности  $KB_1$  и  $KB_2$  (см. рис. 2). Катушка взаимной индуктивности  $KB$  вместе с фазометром  $\Phi_1$  используется для измерения фазы  $r$ -ой составляющей ЭДС 1-й гармоники.

На рис. 3 показана конструкция преобразователя с двумя возбуждающими полюсами  $ВП_1$  и  $ВП_2$ , по которым протекают противоположно направленные токи.  $ВП_1$  и  $ВП_2$  расположены на лучах при  $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pi$ . Секции измерительных обмоток  $ИС_1$ ,  $ИС_3$ ,  $ИС_3^*$  и  $ИС_3^{**}$  имеют угловые координаты  $\pi/3$ ;  $\pi/2$ ;  $-\pi/6$ ;  $-(5/6)\pi$  соответственно. Конструкция этого преобразователя аналогична конструкции преобразователя, показанного на рис. 1

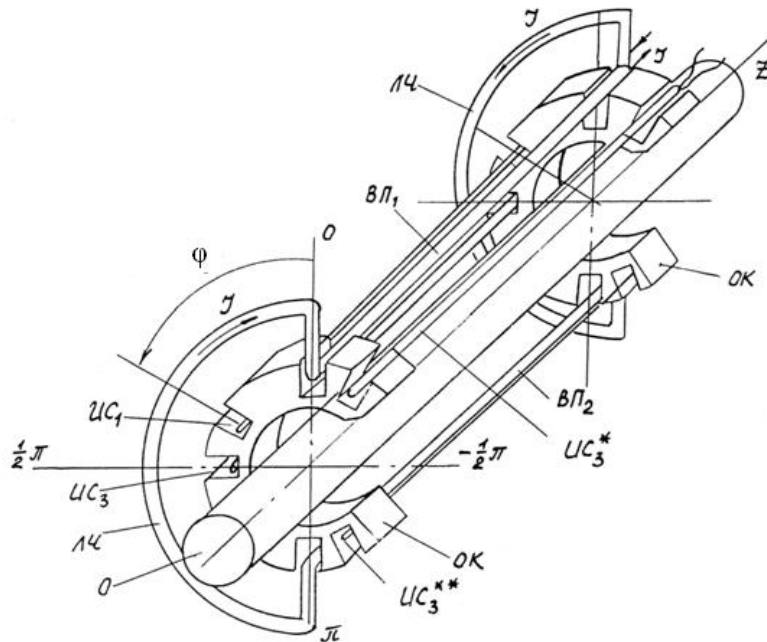


Рис. 3 – Электромагнитный преобразователь с двумя возбуждающими полюсами и секциями измерительной обмотки

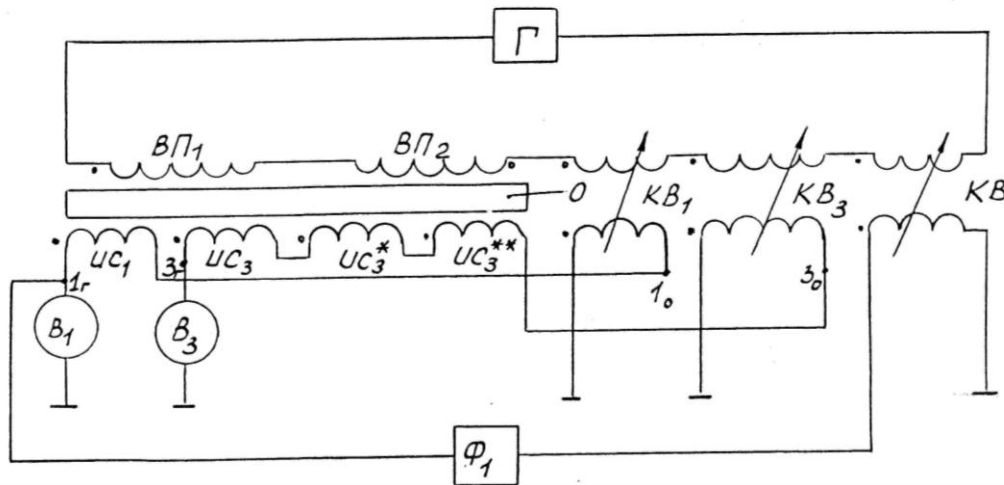


Рис. 4 – Электрическая схема включения электромагнитного преобразователя с двумя возбуждающими полюсами

Наличие двух возбуждающих полюсов с токами противоположных направлений дают возможность создать многовитковую намагничивающую обмотку (наматываемую одним проводом) с лобовыми частями ЛЧ этой обмотки (см. рис. 3). Преобразователь имеет также технологическое окно, через которое можно вводить образец в преобразователь.

На рис. 4 представлена схема включения электромагнитного преобразователя с двумя возбуждающими полюсами.

Секция ИС<sub>1</sub> включена последовательно-встречно с вторичной обмоткой катушки взаимной индуктивности КВ<sub>1</sub>. Секции ИС<sub>3</sub>, ИС<sub>3</sub><sup>\*</sup> и ИС<sub>3</sub><sup>\*\*</sup> соединены между собой последовательно-согласно (см. рис. 4), а с вторичной обмоткой КВ<sub>3</sub> – последовательно-встречно. Вольтметры В<sub>1</sub> и В<sub>3</sub> измеряют r-ые составляющие вносимых ЭДС 1-й и

3-й гармоник поля, а фазометр Φ<sub>1</sub> – фазу 1-й пространственной гармоники.

Рассмотрим пример расчета ЭДС в измерительных проводниках для конструктивных решений с одним возбуждающим током (см. рис. 1).

Расположение измерительных проводников в первой системе примем следующее: ИС<sub>1</sub> помещен над возбуждающим проводником ВП (можно их поместить и под ВП); ИС<sub>2</sub> сдвинут по азимуту относительно ВП на угол φ = 90°. С помощью ИС<sub>1</sub> измеряется результирующая ЭДС первой, второй, третьей и т.д. пространственных гармоник. Измерительным проводником ИС<sub>2</sub> определяется результирующая ЭДС четных гармоник с преобладающими второй и четвертой.

Рассчитаем на конкретном примере численные значения результирующих ЭДС измерительных проводников данной системы.

В работе использовались преобразователи с полями:  $W_n = 30$ ;  $d = 1,7 \cdot 10^{-2}$  м;  $I = 5$  А;  $f = 10^3$  Гц; длина ВП – 1 м; ВП – нитевидный проводник.

Исследуемое цилиндрическое изделие изготовлено из стали X18H10T с параметрами:  $\mu_r = 3$ ;  $\sigma = 0,132 \cdot 10^7$  См/м;  $a = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м.

Сначала, согласно выражению, приведенному в работе [5], рассчитаем ЭДС различных гармоник в измерительных проводниках системы без изделия. При этом:  $E_{10} = 266$  мВ,  $E_{20} = 133$  мВ,  $E_{30} = 89$  мВ,  $E_{40} = 66$  мВ. Согласно [5] находим обобщенный параметр  $x = 2,68$ . Далее определяем значения нормированных ЭДС и фазовых углов, для перечисленных гармоник:  $A_1 = 0,187$ ;  $tg\Phi_1 = -0,360$ ;  $A_2 = 0,189$ ;  $tg\Phi_2 = -0,142$ ;  $A_3 = 0,170$ ;  $tg\Phi_3 = -0,073$ ;  $A_4 = 0,150$ ;  $tg\Phi_4 = -0,046$ . Затем определяем ЭДС для интересующих гармоник:  $E_1 = 39,7$  мВ;  $E_2 = 25,1$  мВ;  $E_3 = 15,1$  мВ;  $E_4 = 9,9$  мВ.

Таким образом, результирующая ЭДС измерительного проводника ИС<sub>1</sub> включающая в себя первую, вторую, третью и четвертую гармоники с учетом фазовых сдвигов каждой из них равна 21,8 мВ. Результирующая ЭДС ИС<sub>2</sub> при учете второй и четвертой гармоник составляет 3,97 мВ.

Величину погрешности, связанной с не учётом при вычислениях остальных гармоник можно оценить по отношению амплитуды первой отбрасываемой гармоники к алгебраической сумме ЭДС этой отбрасываемой и учитываемых гармоник. К примеру, для ИС<sub>1</sub> отбрасывание третьей гармоники приведет к погрешности расчета результирующей ЭДС, равной 5%. Эту погрешность можно уменьшить, если использовать ленточный возбуждающий проводник с конечной угловой шириной. Например, при  $\gamma = 15^\circ$  данная погрешность составляет 4%.

**Выводы.** Таким образом, каждая пространственная гармоника электромагнитного поля

по-разному проникает в проводящий цилиндр, а, следовательно, и реакция изделия на каждую зондирующую пространственную гармонику будет различна. Такое различие проявляется в изменении характерных признаков гармоник, т. е. их амплитуд и временных фаз. Это дает возможность использовать и выбрать тип преобразователя с пространственно-периодическими полями для многопараметровых измерений.

**Список литературы:** 1. Мишунин В. В. Информационно-измерительные и управляющие системы / В. В. Мишунин, Е. В. Корсунова, В. И. Ищенко. – Белгород : БелГУ, 2010. – 129 с. 2. Клюев В. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. – Москва: Машиностроение. – 2003. – 588 с. 3. Сухоруков В. В. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль. – Москва : Высшая школа, 1992. – 312 с. 4. Горкунов Б. М. Многопараметровый электромагнитный контроль токопроводов в пространственно-периодических полях / Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко, И. В. Горкунова // Актуальні проблеми автоматизації і приладобудування. – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 9. – С. 39-40. 5. B. Gorkunov, A. Tyshchenko, I. Gorkunova, Vu Suan Vuong. Multiparametr electromagnetic sensors for information systems of control and management / B. Gorkunov, A. Tyshchenko, I. Gorkunova, Vu Suan Vuong // Electrotechnic and computer systems. – Odessa: ONPU. – 2015. – № 19(95). – P. 129-131.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mishunin, V. V., E. V. Korsunova and V. I. Ishchenko. *Informatsionno-izmeritelnyye i upravlyayushchie sistemy*. Belgorod: BelGU, 2010. Print. 2. Klyuev, V. V. *Nerazrushayushchiy control*. Moscow: Mashinostroenie. – 2003. Print. 3. Suhorukov, V.V. *Nerazrushayushchiy control. Elektromagnitnyiy control*. Moscow: Vysshaya shkola, 1992. Print. 4. Gorkunov, B. M., A. A. Tyshchenko and I. V. Gorkunova. "Mnogoparametrovyy elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvenno-periodicheskikh polyah." Kharkov : *Visnyk NTU «KhPI»*. – no. 9. – 2014. – P.39-40. Print. 5. Gorkunov, B. M., A. A. Tyshchenko and I. V. Gorkunova. "Mnogoparametrovyy elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvenno-periodicheskikh polyah ". Odessa : *Electrotechnic and computer systems*. No. 9(95). – 2015. – 129-131. Print.

Поступила (received) 01.02.2016

**Горкунов Борис Митрофанович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры "Информационно-измерительные технологии и системы", г. Харьков; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Gorkunov Boris Mitrofanovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of " Information-measuring technologies and systems", Kharkov; tel.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Тищенко Анна Анатольевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры "Приборы и методы неразрушающего контроля"; г. Харьков; тел.: (095) 751-49-43; e-mail: [ant\\_31@mail.ru](mailto:ant_31@mail.ru).

**Tyshchenko Anna Anatolyevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.) , National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant at the Department of "The devices and methods of nondestructive testing"; Kharkov; tel.(095) 751-49-43; e-mail: [ant\\_31@mail.ru](mailto:ant_31@mail.ru).

**Шибан Тамер** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант; г. Харьков; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Shiban Tamer** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student; Kharkov; tel.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).