

УДК 620.179.14

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.12

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ДЛЯ СИСТЕМ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО КОНТРОЛЯ

Б. М. ГОРКУНОВ^{1*}, Е. А. БОРИСЕНКО¹, ШИБАН ТАМЕР¹, ШАХИН ИССАМ²

¹ кафедра информационно-измерительных технологий и систем, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

² помощник ректора, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

*email: gorkunov@kpi.kharkov.ua

АННОТАЦИЯ В работе рассмотрена проблема контроля параметров металлических изделий при воздействии на них электромагнитного поля индукционных установок. В качестве датчика рассмотрен электромагнитный преобразователь с пространственно-периодической структурой поля, представляющий собой соленоид на немагнитном полимерном каркасе с контролируемым объектом в форме протяженного цилиндрического ферромагнитного сердечника. Показано, что такой датчик позволяет бесконтактно измерять электропроводность, магнитную проницаемость и геометрические параметры металлических изделий.

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

ELECTROMAGNETIC TRANSDUCER WITH SPATIALLY-PERIODICAL FIELD STRUCTURE FOR MULTI-PARAMETER INSPECTION SYSTEMS

B. GORKUNOV^{1*}, E. BORISENKO¹, SHAIWAN TAMER¹, SHAHIN ISSAM²

¹ department of information-measuring technologies and systems, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

² rector assistant, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT This paper considers the problem of providing the optimal operating mode of induction units, for which it is necessary to ensure the matching of the frequency converter and, its complex load – inductor. A peculiarity of the system “inductor-heated object” is the dependence of its resonant frequency, Q-factor and impedance on the conductivity and permeability of this object, which, in turn, are functions of temperature. The most dramatic changes in specified parameters are taking place when the heated object is ferromagnetic material and its temperature goes up through Curie point. The purpose of the report is to study the possibility of using eddy current transducers with a spatially periodic field structure to monitor the parameters of a heated sample. Eddy current transducers are widely used in measurement and non-destructive testing in flaw detection, material structure research, coating thickness determination, and for other tasks. The paper proposes a transducer model with spatially periodic structure of the electromagnetic field, using which one can place the measuring windings so that the output signal of the converter would contain information about the parameters of several harmonics. In this case, the amplitude and phase of each spatial harmonic is to be considered an independent informative parameter. The result of the research is an algorithm providing contactless measurement of the conductivity, magnetic permeability and diameter of a cylindrical sample, which is based on the values of amplitudes and phases of spatial harmonics obtained by calculation. Transducer that follows certain requirements to the design can be used at high temperatures and in the zone of strong electromagnetic fields.

Keywords: electromagnetic transducer; spatially-periodical structure of the electromagnetic field; conductivity; magnetic permeability.

Введение

Индукционные установки находят широкое применение при термообработке металлов, для нагрева теплоносителей и в других сферах. При проектировании таких установок для обеспечения оптимального режима их работы следует наилучшим образом согласовать электрические параметры преобразователя частоты и индуктора, являющегося его активно-индуктивной комплексной нагрузкой. Особенностью системы индуктор–нагреваемый объект является зависимость ее параметров – резонансной частоты, добротности, импеданса – от удельной проводимости σ и удельной магнитной проницаемости μ этого объекта, которые, в свою

очередь, являются функциями температуры [1,2]. Наиболее резкие изменения в указанных параметрах происходят, когда нагретый объект является ферромагнитным материалом, и его температура проходит через точку Кюри [3]. Поэтому, для обеспечения правильности техпроцесса в соответствии с текущими значениями указанных параметров, как правило, регулируют частоту тока возбуждения индуктора. В итоге возникает задача непосредственного определения параметров σ и μ , либо их косвенное определение по температуре при известных законах $\sigma = f(T)$ и $\mu = f(T)$. Причем, желательно, чтобы метод был бесконтактным, поскольку температуры нагреваемого объекта могут

быть высокими, и он может перемещаться при нагреве [4].

Среди конкурирующих методов неразрушающего контроля (НК) можно перечислить электропотенциальный, вихрекомагнитный и многочастотный вихрековый [5-7]. Электропотенциальный метод осложнен необходимостью воздействия значительными токами (до десятков кА), вихрекомагнитный требует достаточно точной подстройки тока подмагничивания для работы с конкретным материалом. При многочастотном вихрековом 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.

Таким образом, универсальность метода вихрекового контроля обуславливает необходимость проработки математического описания картины электромагнитного поля, возникающего в системе «вихрековый преобразователь – исследуемый объект». Наличие такой модели способствует решению задачи идентификации неизвестного объекта по реакции на его появление электромагнитного поля.

Измерительные преобразователи, работающие на вихревых токах, широко применяются в технике измерений и неразрушающем контроле при дефектоскопии, исследовании структуры материала, определении толщин покрытий, определения температуры металлов и для других задач.

Цель работы

Дальнейшим развитием метода является разработка подхода для решения обратной задачи, которая заключается в идентификации параметров контролируемого объекта путем измерения параметров электромагнитного поля с пространственно-периодической структурой, изменяющихся при помещении в него этого объекта.

В данной публикации рассматривается задача контроля электромагнитных параметров металлических изделий, являющихся составной частью электромагнитной системы индукционных установок.

Изложение основного материала

В основу вихрекового метода НК положен анализ электромагнитного поля, создаваемого вихревыми токами, протекающими в контролируемом металлическом объекте. Физически, вихрековый преобразователь (ВП) с пространственно-периодической структурой электромагнитного поля представляет собой генераторный датчик трансформаторного типа с одной обмоткой

возбуждения и несколькими измерительными обмотками. Особенностью ВК является возможность его применения при многопараметровом контроле, а именно такой подход зачастую является единственным, который может обнаружить напряженно-деформированное состояние, либо идентифицировать тип материала исследуемого металлического объекта. В качестве параметров контролируемого объекта принимают его удельную проводимость σ , относительную магнитную проницаемость μ , геометрические размеры. Также контролю может подлежать состояние структуры материала объекта, при исследовании напряжений и деформаций.

При решении задач многопараметрового контроля для расширения количества контролируемых параметров изделия удобно применить модель пространственно-периодической структуры поля. Имея такую модель, измерительные обмотки могут быть размещены таким образом, чтобы можно было получить информацию о параметрах нескольких гармоник. При этом амплитуда и фаза каждой пространственной гармоники является, в общем случае, независимым информативным параметром.

В индукционных установках нагреваемый металлический объект может иметь формы цилиндра, листа и прочие. Рассмотрим случай, когда объект является цилиндрическим, поскольку это позволяет нагляднее проиллюстрировать решение прямой и обратной задачи с использованием алгоритма построения пространственно-периодического поля.

Пусть имеется (рис. 1), ферромагнитный цилиндр b радиуса a , который находится в электромагнитном поле, создаваемом возбуждающим проводником (ВП) l , расположенном от оси образца на расстоянии d .

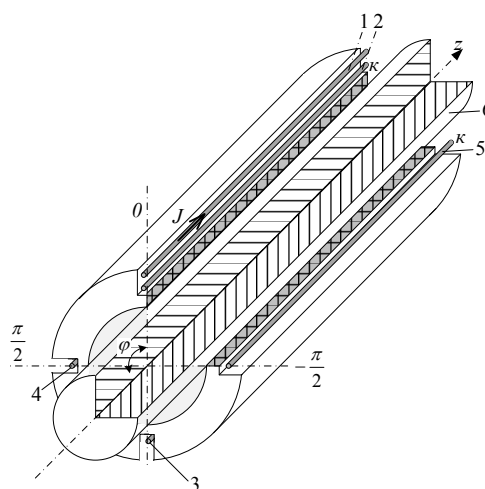


Рис. 1 – Взаимное расположение металлического цилиндра, измерительного и возбуждающего проводника

По проводнику l в направлении, совпадающим с положительным направлением оси z , течет синусоидальный ток, плотностью J . Продольная ось z образца является центром окружности радиуса r ($r=d$), по которой расположены измерительные проводники (ИП) 2, 3, 4, 5. Положение каждой из обмоток описывается угловой координатой φ , отсчитываемой от обмотки 1.

Для такой пространственной модели в [8, 9] были получены выражения для r -й и φ -й компоненты напряженности магнитного поля внутри и вне цилиндрического изделия, позволяющие представить его составляющие в виде разложения в ряды Фурье по пространственным гармоникам с учетом угловой полуширины полюса (обмотки с током) γ :

$$\begin{aligned} H_r(r, \varphi, t) &= e^{i\omega t} j \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r) \sin(n\varphi) \\ H_\varphi(r, \varphi, t) &= e^{i\omega t} j \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} g_n(r) \cos(n\varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

где n – номер пространственной гармоники; $\omega = 2\pi f$ – частота зондирующего поля; f_n и g_n – функции распределения \sin и \cos составляющих соответствующих пространственных гармоник электромагнитного поля

При рассмотрении первых двух гармоник ряда, пространственная картина поля с указанием расположения измерительных и возбуждающих проводников показана на рис. 2.

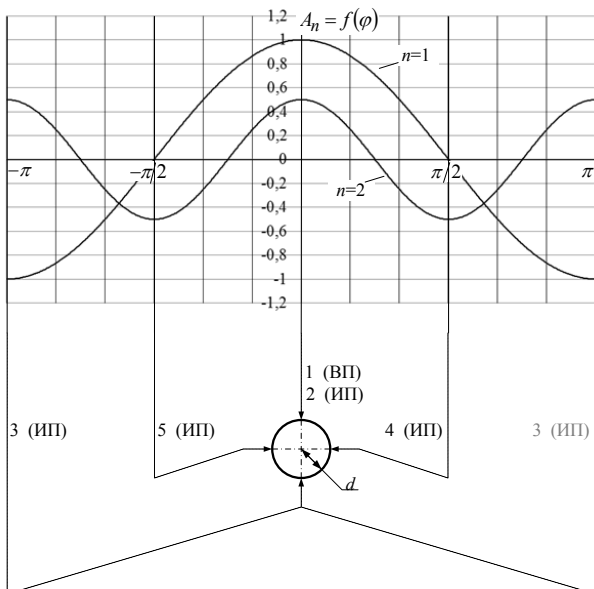


Рис. 2 – Первая и вторая пространственная гармоники электромагнитного поля

Для получения амплитуд пространственных гармоник производят процедуру измерений без

образца. Для выделения амплитуды E_{10} первой пространственной гармоники измерительные проводники 2 и 3 подключают последовательно и встречно; для второй пространственной гармоники E_{20} измерительные проводники 4 и 5 подключают последовательно и согласно. Затем в вихретоковый преобразователь помещают образец, по описанному выше алгоритму вновь определяют амплитуды пространственных гармоник E_1 и E_2 , а фазометром измеряют угол первой пространственной гармоники относительно тока ВП. При этом, ток J в ВП с образцом и без него должен оставаться неизменным.

Далее определяют нормированные амплитуды первой и второй гармоники как отношения $A_1 = \frac{E_1}{E_{10}}$,

$$A_2 = \frac{E_2}{E_{20}}.$$

Для определения параметров образца необходимо получить теоретические зависимости для первой и второй пространственных гармоник [10, 11]. Система уравнений (1) имеет решения для функций f_n и g_n , которые после выделения действительной и мнимой части функций Бесселя, с помощью функций Кельвина *ber* *bei* позволяют получить выражения для амплитуд и фаз i -й пространственной гармоники. Для практического применения целесообразно осуществить нормировку выражений для ЭДС в случае наличия контролируемого изделия к ЭДС в случае отсутствия контролируемого изделия, которая определяется как $E_{n0} = -4,44 f \mu_0 \frac{J \sin(n\gamma)}{\pi n \gamma}$, где f –

частота тока, питающего обмотку возбуждения. В результате могут быть получены выражения для нормированной амплитуды n -й пространственной гармоники

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

и ее фазы

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

где

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} f_n &= \frac{a_n^{(+)}(\mu a_n^{(+)} + a_n^{(-)}) + b_n^{(+)}(\mu b_n^{(+)} + b_n^{(-)})}{(\mu a_n^{(+)} + a_n^{(-)})^2 + (\mu b_n^{(+)} + b_n^{(-)})^2} \\ \operatorname{Im} f_n &= \frac{-a_n^{(+)}(\mu b_n^{(+)} + b_n^{(-)}) + b_n^{(+)}(\mu a_n^{(+)} + a_n^{(-)})}{(\mu a_n^{(+)} + a_n^{(-)})^2 + (\mu b_n^{(+)} + b_n^{(-)})^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_n^{(+)} &= \operatorname{ber}_{n-1} x + \operatorname{ber}_{n+1} x; \quad a_n^{(-)} = \operatorname{ber}_{n-1} x - \operatorname{ber}_{n+1} x; \\ b_n^{(+)} &= \operatorname{bei}_{n-1} x + \operatorname{bei}_{n+1} x; \quad b_n^{(-)} = \operatorname{bei}_{n-1} x - \operatorname{bei}_{n+1} x. \end{aligned}$$

При составлении данных выражений была введена переменная x , которая является функцией исходных величин.

$$x = a\sqrt{\mu_0\mu\sigma\omega}. \quad (4)$$

Применение универсальных функций позволяет решить обратную задачу определения электромагнитных и геометрических параметров исследуемого образца.

При появлении дефекта или структурного изменения в зоне контроля благодаря измерению нескольких параметров – амплитуд и фаз пространственных гармоник – его обнаружение может быть осуществлено с большей достоверностью.

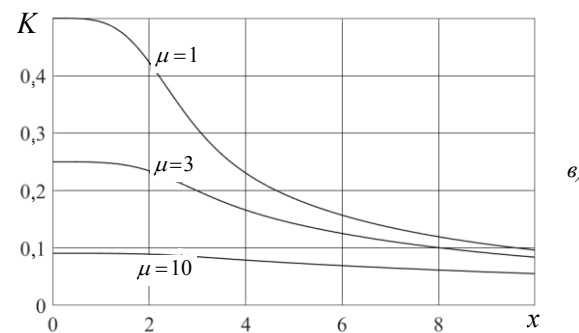
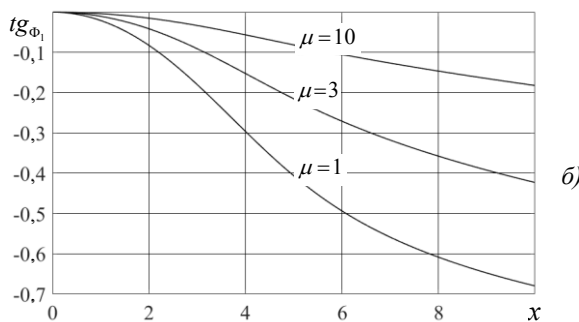
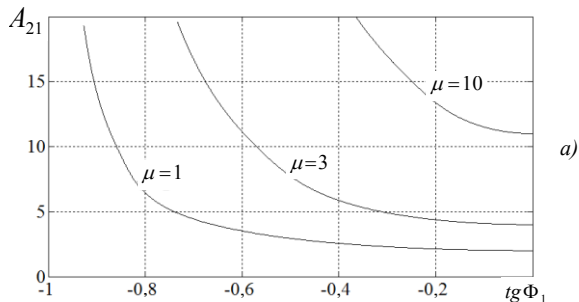


Рис. 3 – Теоретические зависимости для определения параметров образца

Обсуждение результатов

Алгоритм решения обратной задачи состоит в следующем. Зная пространственно-периодическую структуру поля (см. рис. 2) измерительные и возбуждающую обмотки располагают таким образом, что в выходном сигнале возможно выделить амплитуды первой и второй гармоники, а также фазу первой гармоники. Пронормировав эти амплитуды

получим значения, которые позволяют получить значения универсальной функции преобразователя

$$A_{21} = \frac{A_2}{(A_1)^2}.$$

Используя известные [8, 9] теоретические зависимости $A_{21} = f(\operatorname{tg}\Phi_1)$ (рис. 3а) по измеренным значениям A_2 , A_1 и $\operatorname{tg}\Phi_1$ определяем значение магнитной проницаемости μ .

Используя известные теоретические зависимости $\operatorname{tg}\Phi_1 = f(x)$ (рис. 3б) по измеренному ранее значению $\operatorname{tg}\Phi_1$ и определенной на предыдущем этапе магнитной проницаемости μ , определяем значение функции x . В ряде случаев диаметр a исследуемого образца может быть известен неточно, тогда для определения σ необходимо вначале найти диаметр образца. Сделать это можно пользуясь известными теоретическими зависимостями

$$K = f(x), \text{ (рис. 3в) из выражения } a = A_1 \frac{d}{K}.$$

После чего из выражения $\sigma = \frac{x^2}{a^2 \mu_0 \mu_r}$ можно определить значение удельной проводимости, что в совокупности со значением магнитной проницаемости, позволит достаточно полно характеризовать структуру исследуемого образца.

Выводы

Рассмотренные в работе алгоритм выполнения измерений и конструкция преобразователя позволяют определить геометрические и электромагнитные параметры образца, помещенного в поле индукционной установки. Для обеспечения работоспособности обмоток преобразователя в сильных полях и при высоких температурах намотку следует выполнять тонким проводом из жаропрочного сплава. При воздействии полей индукционной установки обмотки преобразователя должны быть разомкнутыми, чтобы избежать их разрушения. При измерениях индуктор следует отключить, на время выполнения измерений и подать в ВП ток возбуждения фиксированной частоты. В виду малости этого времени включение описанного электромагнитного преобразователя в конструкцию индукционной установки существенно на ее функционирование не повлияет.

Преимуществом предложенного алгоритма и устройства является возможность одновременного измерения трех параметров изделия и позволяет бесконтактно осуществить экспресс-анализ цилиндрического изделия без его разрушения, что особо важно при значительных размерах изделия и его высокой температуре.

В зависимости от конструктивных особенностей конкретной индукционной установки и возможностей размещения ВП и ИП описанный

алгоритм может быть модифицирован с целью определения характеристик (амплитуд и фаз) пространственных гармоник других порядков.

Список литературы

- Cedillo, E.** An apparatus for the measurement of initial magnetic permeability as a function of temperature / **E. Cedillo, J. Ocampo, V. Rivera, R. Valenzuela** // *J. of Physics E: Scientific Instruments*. – 1980 – **13**. – 383-386. – doi: 10.1088/0022-3735/13/4/005.
- Клюев, В. В.** Измерения, контроль, испытания и диагностика / **В. В. Клюев**. – Москва: Машиностроение, 1996. – 464 с.
- Wu, T. H., Wei, P. S.** Curie temperature effects on resistance spot welding. *J. Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, 2011, 179–183, doi: 10.1109/IMPACT.2011.6117206.
- Сухоруков, В. В.** Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль / **В. В. Сухоруков**. – Москва: Высшая школа, 1992. – 312 с.
- Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. **В. В. Клюева**. Т.2: В 2 кн. – Москва: Машиностроение, 2003. – 688 с.
- Büyüköztürk, O.** Nondestructive Testing of Materials and Structures / **Oral Büyüköztürk, Mehmet Ali Taşdemir** / *Vol. 6 of RILEM Bookseries*. – 2012. – 1278 pp. – doi: 10.1007/978-94-007-0723-8.
- Горкунов, Б. М.** Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий / **Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа** // *Вестник НТУ "ХПИ"*, Харьков. – № 5. – 2004. – С. 93-99.
- Горкунов, Б. М.** Многопараметровый электромагнитный контроль токопроводов в пространственнопериодических полях / **Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко, И. Б. Горкунова** // *Актуальні проблеми автоматики і приладобудування*. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – С. 39-40.
- А. С. 1287067 (СССР) Способ бесконтактного измерения параметров цилиндрических проводящих изделий / **Б. М. Горкунов, С. С. Романов, В. П. Себко**. – Оpubл. в Б.И., 1987, № 4.
- Ландау, Л. Д.** Электродинамика сплошных сред / **Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц**. – Москва: Гос. Издательство физико-математической литературы, 1959. – 532 с.
- Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. **М. Абрмовица, М. Стиган**. – Москва: Наука, 1979. – 452 с.
- Cedillo, E., Ocampo, J., Rivera, V., Valenzuela, R.** An apparatus for the measurement of initial magnetic permeability as a function of temperature. *J. of Physics E: Scientific Instruments*, 1980, **13**, 383–386, doi: 10.1088/0022-3735/13/4/005.
- Klyuev, V. V.** Izmereniya, kontrol, ispyitaniya i diagnostika [Measurement, control, testing and diagnostics], Moskwa, Mashinostroenie, 1996, 464.
- Wu, T. H., Wei, P. S.** Curie temperature effects on resistance spot welding. *J. Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, 2011, 179–183, doi: 10.1109/IMPACT.2011.6117206.
- Suhorukov, V. V.** Nerazrushayuschiy kontrol. V 5 kn. Kn. 3. Elektromagnitnyy kontrol [Non-destructive testing. 3. Electromagnetic testing], Moskwa, Vysshaya shkola, 1992, 312.
- Nerazrushayuschiy kontrol: Spravochnik [Non-destructive testing. Handbook]: Pod obsch. red. **V. V. Klyueva**. T.2. [In 7 Vol. Ed. **V.V. Klyuev**. 2], Moskwa: Mashinostroenie, 2003, 688.
- Büyüköztürk, Oral, Taşdemir, Mehmet Ali.** Nondestructive Testing of Materials and Structures, Vol. 6 of RILEM Bookseries, 2012, 1278, doi: 10.1007/978-94-007-0723-8.
- Gorkunov, B. M., Tyupa, I. V.** Vihretokovyiy dvuhparametrovyiy kontrol ferromagnitnyih tsilindricheskikh izdeliy [Eddy-current two-parameter testing of ferromagnetic cylindrical bodies]. *Vesnik NTU "KhPI"*, Kharkov, 5, 2004, 93-99.
- Gorkunov, B. M., Tischenko, A. A., Gorkunova, I. B.** Mnogoparametrovyiy elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvennoperiodicheskikh polyah [Multi-parameter electromagnetic testing of current conductors in spatially-periodical fields]. *Aktualni problemi avtomatiki i priladobuduvannya*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2014, 39-40.
- A.S. 1287067 (SSSR) Sposob beskontaktnogo izmereniya parametrov tsilindricheskikh provodyaschiy izdeliy [Method for contactless measurement of parameters of cylindrical bodies] / **B.M. Gorkunov, S.S. Romanov, V. P. Sebko, I.**, 1987, 4.
- Landau, L. D., Livshits, E. M.** Electrodynamics of continuous environments, Moskwa, Gos. izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1959, 532.
- Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami [Handbook for special functions with formulas, graphs and math tables] / Pod red. **M. Abrmovitsa, M. Stigan**, Moskwa, Nauka, 1979, 452.

Bibliography (transliterated)

Сведения об авторах (About authors)

Горкунов Борис Митрофанович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры информационно-измерительных технологий и систем, г. Харьков, Украина; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua.

Gorkunov Boris – DSc, Professor, information-measuring technologies and systems department, National technical university “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua.

Борисенко Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры информационно-измерительных технологий и систем, г. Харьков, Украина; e-mail: 4borisea@gmail.com.

Borisenko Eugene – PhD, docent at information-measuring technologies and systems department, National technical university “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: 4borisea@gmail.com.

Шибан Тамер – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры информационно-измерительных технологий и систем, г. Харьков, Украина.

Shaiban Tamer – post-graduate student at information-measuring technologies and systems department, National technical university “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv, Ukraine.

Шахин Иссам – кандидат технических наук, доцент, помощник ректора, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.

Shahin Issam – Ph.D., Associate Professor, Assistant Rector, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Горкунов, Б. М. Электромагнитный преобразователь с пространственно-периодическим полем для систем многопараметрового контроля / **Б. М. Горкунов, Е. А. Борисенко, Шибан Тамер, Шахин Иссам** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 80-85. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.12.

Please cite this article as:

Gorkunov, B., Borisenko, E., Shaiban, Tamer, Shahin, Issam. Electromagnetic transducer with spatially-periodical field structure for multi-parameter inspection systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **26** (1302), 1, 80-85, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.12.

Будь ласка, посилайте на цю статтю наступним чином:

Горкунов, Б. М. Электромагнітний перетворювач з просторово-періодичним полем для систем багатопараметрового контролю / **Б. М. Горкунов, Є. А. Борисенко, Шибан Тамер, Шахін Иссам** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 80-85. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.12.

АНОТАЦІЯ У роботі розглянута проблема контролю параметрів металевих виробів при впливі на них електромагнітного поля індукційних установок. якості датчика розглянуто електромагнітний перетворювач з просторово-періодичною структурою поля, що представляє собою соленоїд на немагнітному полімерному каркасі з контрольованим об'єктом у формі протяжного циліндричного феромагнітного сердечника. Показано, що такий датчик дозволяє безконтактно вимірювати електропровідність, магнітну проникність і геометричні параметри металевих виробів.

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

Поступила (received) 01.07.2018