

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОДОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПОПЕРЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ВАЛУ

Б. М. ГОРКУНОВ^{*1}, С. Г. ЛЬВОВ¹, САЛИБА АБДЕЛЬ НУР¹, ИССАМ ШАХИН²

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

² кафедра технической электрохимии, НТУ "ХПИ", Харьков, УКРАИНА

*e-mail: b.gorkunov51@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В работе рассмотрен трансформаторный вихретоковый преобразователь, включенный по дифференциальной схеме, и предложен метод контроля механического напряжения в металлических цилиндрических изделиях в реальном времени. На основе наличия корреляционных связей между электромагнитными характеристиками металлов и их структурным состоянием предложен метод бесконтактного контроля механической деформации изделия. Выбран обобщенный нормированный информативный магнитный параметр и на его основе получены основные функции преобразования для определения приращений относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости нагружаемого изделия относительно стандартного образца. Показана возможность использования дифференциального метода для увеличения чувствительности контроля механических параметров цилиндрических изделий. Разработана физическая модель электромагнитного преобразователя с изделием, которое подвергается кручению, дано теоретическое обоснование на уровне доменной структуры исследуемого материала и электромагнитных явлений. Создана экспериментальная установка, получены результаты экспериментальных исследований влияния механического момента, вызванного кручением объекта, на его электромагнитные свойства. Предложены амплитудный и фазовый методы контроля механических напряжений. Результаты работ позволяют сделать вывод, что существует рациональный режим работы преобразователя в диапазоне $1 \leq x \leq 3$, при котором для $\eta=0,38$ погрешности определения $\gamma_{\text{мр}}$ и $\gamma_{\text{с}}$ не превышают 1% и 3% соответственно. Следует заметить, что в этом же диапазоне изменения x относительная чувствительность преобразователя максимальна. Это позволяет создавать промышленные устройства бесконтактного многопараметрового контроля физико-механических параметров металлических изделий и конструкций. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований не противоречат ранее известным законам теоретической механики, что позволяет широко применять их в практике неразрушающего контроля. (на языке статьи)

Ключевые слова: трансформаторный вихретоковый преобразователь; дифференциальная схема; контроль механической деформации; относительная магнитная проницаемость; удельная электрическая проводимость.

DEPENDENCE OF LONGITUDINAL MAGNETIC PERMEABILITY AND TRANSVERSE CONDUCTIVITY ON MECHANICAL LOADS ON THE SHAFT

B. GORKUNOV^{*1}, S. LVOV¹, SALIBA ABDEL NOUR¹, ISSAM SHAHINE²

¹ department of information-measuring techniques and systems, NTU "KhPI", Kharkov, UKRAINE

² department of Technical Electrochemistry, NTU "KhPI", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT. This research deals with transformer type eddy-current transducer connected in differential circuit and it also proposes method for real-time evaluating mechanical tension in metal cylindrical products. The authors have proposed contactless method for estimating product mechanical deformation which is based on utilizing correlation connections between metals' electromagnetic properties and their structural condition. The authors have introduced a generalized normalized informative magnetic parameter and on its basis obtain basic transform functions aided for determining increments of relative magnetic permeability and specific electric conductivity of product under load comparatively to standard sample. The article shows the possibility of using the differential method to increase the sensitivity of the evaluation of cylindrical products mechanical parameters. The authors have developed a physical model of an electromagnetic transducer with a product that is subjected to torsion, a theoretical justification is given at the level of the domain structure of the material under study and electromagnetic phenomena. The authors have created an experimental setup, the results of experimental studies of the influence of the mechanical moment caused by the torsion of an object on its electromagnetic properties were obtained. The research has proposed amplitude and phase methods for evaluating mechanical stresses. The results of the research allow to conclude, that there is an efficient transducer operating mode in the range $1 \leq x \leq 3$, in which for $\eta = 0,38$ errors of γ_{mr} and $\gamma_{\text{с}}$ estimation are less than 1% and 3% correspondingly. It is also noticeable, that in this range of x relative sensitivity of transducer is maximal. This allows us to create industrial devices for contactless multi-parameter evaluation of physical and mechanical parameters of metal products and structures. The obtained results of theoretical and experimental studies do not contradict the previously known laws of theoretical mechanics, which allows them to be widely used in the practice of non-destructive testing.

Keywords: transformer eddy-current transducer; differential circuit; mechanical deformation estimation; relative magnetic permeability; specific electrical conductivity.

© Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, Салиба Абдель Нур, Иссам Шахин, 2019

Введение

Для решения задачи обеспечения безопасности эксплуатации оборудования необходимы высокопроизводительные высокоинформативные методы и средства контроля. Перспективными для бесконтактного исследования механических напряжений являются электромагнитные методы, которые позволяют получать первичную информацию в виде электрических сигналов [1-4].

Механические и электромагнитные свойства материалов закладываются на уровне структуры и взаимосвязаны. Все изменения в структуре материала в процессе деформирования, зарождения и развития микрповреждений отражаются в соответствующих изменениях электромагнитных параметров. Наличие внутренних напряжений, которые возникают как на этапе формирования конструкции (отдельных ее элементов), так и в процессе ее эксплуатации, зачастую обусловлено наличием внешних механических напряжений, которые приводят к возрастанию внутренней энергии кристаллической решетки. Все эти внутренние изменения так или иначе в макроскопических масштабах влияют на поведение образца в электромагнитном поле, что в свою очередь позволяет использовать преобразователи электромагнитного типа, которые дадут возможность контролировать механические напряжения в образце посредством определения электромагнитных параметров [2, 5].

Цель работы

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию трансформаторного электромагнитного преобразователя для бесконтактного контроля физико-механических параметров цилиндрических изделий.

Изложение основного материала

Предварительные исследования данного вопроса показали необходимость создания адекватной модели поведения электромагнитной структуры объекта контроля в электромагнитном поле при воздействии приложенной механической силы.

На рис.1 представлен цилиндрический образец (вал механической системы), один из концов которого зашпелен. Вал помещен в переменное электромагнитное поле напряженностью H_0 , которое создается намагничивающей обмоткой электромагнитного преобразователя. Информативные сигналы о состоянии объекта контроля снимаются с измерительной обмотки преобразователя.

Введем понятие параллельной B_{\parallel} и перпендикулярной составляющей вектора магнитной индукции B_{\perp} . Предположим, что в невозмущенном состоянии относительная магнитная проницаемость μ_r материала является величиной постоянной, как в продольном направлении датчика, так и в перпендикулярном. При этом вектор B_0 располагается параллельно силовым

линиям возбуждающего поля H_0 и определяется выражением:

$$B_0 = \mu_0 \mu_r H_0, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

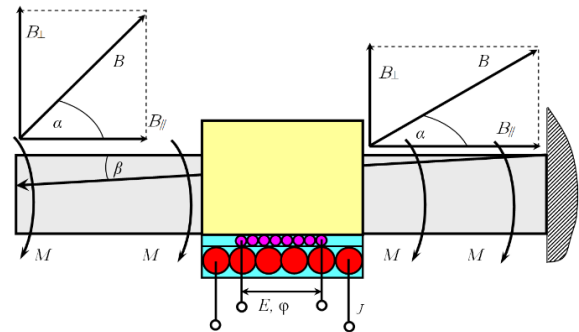


Рис. 1 – Вал в продольном электромагнитном поле при воздействии скручивающего момента

Будем считать, что при появлении крутящего момента M магнитная проницаемость в продольном направлении цилиндрического образца уменьшается, а в поперечном увеличивается на величину $\Delta\mu_r$. При этом в продольном направлении она станет равной величине $\mu_{r\parallel} = \mu_r - \Delta\mu_r$, а в поперечном $\mu_{r\perp} = \mu_r + \Delta\mu_r$.

Очевидно, что угол отклонения вектора суммарной магнитной индукции B зависит от приложенного момента M , т. е. от деформаций, что приведет к уменьшению потокосцепления с витками измерительной обмотки преобразователя и уменьшению ЭДС E .

Величина вектора магнитной индукции B_{\parallel} в таком случае будет определяться выражением:

$$B_{\parallel} = \mu_0 H_0 \mu_{r\parallel} = \mu_0 H_0 (\mu_r - \Delta\mu_r). \quad (2)$$

Отсюда вектор суммарной магнитной индукции можно найти из выражения:

$$B = B_{\parallel} \sin \alpha = \mu_0 H_0 (\mu_r - \Delta\mu_r) \sin \alpha. \quad (3)$$

Магнитный поток Φ , пронизывающий сечение S образца, находят по формуле [6]:

$$\Phi = \mu_0 (\mu_r - \Delta\mu_r) H_0 \frac{2\pi a l_1(kr)}{k l_0(kr)} \sin \alpha. \quad (4)$$

Таким образом, зная магнитный поток, можно для конкретного преобразователя получить зависимость выходной ЭДС от механического напряжения, возникающего в контролируемом образце.

На рис. 2 показана принципиальная схема включения ТЭМП.

Конструктивно ТЭМП выполнен в виде двух идентичных воздушных трансформаторов проходного типа, первичные обмотки которых соединены последовательно-согласно, а вторичные – последовательно-встречно. Следовательно, подключив первичные обмотки ТЭМП к генератору гармонических колебаний G и установив фиксированные значения частоты f и

амплитуды намагничивающего тока I , вольтметром V2 измеряют вносимое ЭДС $E_{вн}$, которое в отсутствие исследуемого образца O должно быть равным нулю. После размещения исследуемого цилиндрического образца с известным диаметром в первый воздушный трансформатор ТЭМП, вольтметрами V1, V2 и V3 измеряют значения ЭДС E_{Σ} , $E_{вн}$ и $E_{\Sigma 0}$.

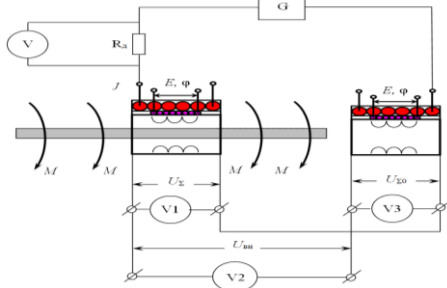


Рис. 2 – Схема электрическая принципиальная включения ТЭМП

Используя векторную диаграмму напряжений (см. рис. 3), можно получить расчетные соотношения для совместного бесконтактного определения μ_r и σ через измеренные значения напряжений ТЭМП, для фиксированных значений напряженности, частоты зондирующего поля и геометрических параметров преобразователя и образца [7].

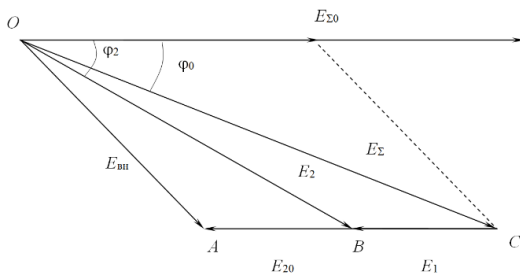


Рис. 3 – Векторная диаграмма напряжений ТЭМП

Из треугольников напряжений ΔOAB и ΔOBC (см. рис. 3), можно записать:

$$E_{вн} = E_2^2 + E_{20}^2 - 2E_2 E_{20} \cos \varphi_2, \quad (5)$$

$$E_{\Sigma} = E_2^2 + E_1^2 - 2E_2 E_1 \cos(\pi - \varphi_2), \quad (6)$$

где E_2 – напряжение ТЭМП, пропорциональное магнитному потоку внутри образца; E_{20} – напряжение ТЭМП, пропорциональное магнитному потоку в воздухе на размере образца; E_1 – напряжение ТЭМП, пропорциональное потоку в воздушном зазоре между измерительной обмоткой ТЭМП и исследуемым образцом; φ_2 – угол сдвига фаз между потоками в изделии и воздушном зазоре или между параметрами E_2 и $E_{\Sigma 0}$.

Известно, что для ТЭМП с ферромагнитным изделием, выражение для E_2 имеет вид [7]:

$$E_2 = \eta \mu_r E_{\Sigma 0} K. \quad (7)$$

Значения напряжений E_{20} и E_1 связаны с $E_{\Sigma 0}$ через коэффициент заполнения выражениями:

$$E_{20} = E_{\Sigma 0} \eta; \quad (8)$$

$$E_1 = (1 - \eta) E_{\Sigma 0}. \quad (9)$$

Решая систему двух уравнений (5) и (6), с учетом (8) и (9) получим:

$$\cos \varphi_2 = \frac{E_{\Sigma}^2 + E_{вн}^2 + E_{\Sigma 0}^2 (2\eta - 1)}{2E_2 E_{\Sigma 0}}. \quad (10)$$

С другой стороны, из треугольников напряжений ΔOAB и ΔOAC получим систему уравнений:

$$E_2^2 = E_{вн}^2 + E_{20}^2 + 2E_{вн} E_{20} \cos \varphi_{вн}; \quad (11)$$

$$E_{\Sigma}^2 = E_{вн}^2 + E_{\Sigma 0}^2 + 2E_{вн} E_{\Sigma 0} \cos \varphi_{вн}. \quad (12)$$

Решая систему уравнений (11) и (12) относительно U_2 и подставив это решение в (10), получим выражение для определения фазового угла φ_2 через измеренные величины напряжений ТЭМП. При этом:

$$\cos \varphi_2 = \frac{E_{\Sigma}^2 - E_{вн}^2 + E_{\Sigma 0}^2 (2\eta - 1)}{2E_{\Sigma 0} \sqrt{\eta E_{\Sigma}^2 + (1 - \eta)(E_{вн}^2 - \eta E_{\Sigma 0}^2)}}. \quad (13)$$

Следует заметить, что функция $\cos \varphi_2$ может быть однозначно рассчитана с помощью функций Бесселя и протабулирована в зависимости от обобщенного параметра $x = \frac{d}{2} \sqrt{2\pi \mu_0 \mu_r \sigma f}$ в широком диапазоне его изменения [8, 9].

Если в соотношении (10) подставить формулу (7) и преобразовать, то получим выражение для расчета μ_r , которое имеет вид:

$$\mu_r = \frac{E_{\Sigma}^2 - E_{вн}^2 + E_{\Sigma 0}^2 (2\eta - 1)}{2\eta E_{\Sigma 0}^2 K_{\mu}}, \quad (14)$$

где $K_{\mu} = K \cdot \cos \varphi_2$ – универсальная функциональная зависимость, которая через параметр x , однозначно связана с $\cos \varphi_2$, график зависимости $K_{\mu} = f_1(\cos \varphi_2)$ приведен на рис. 4.

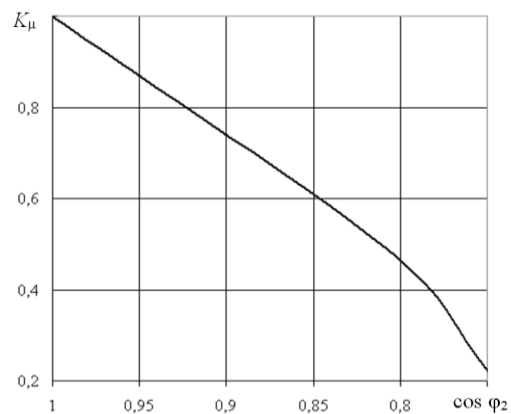


Рис. 4 – График зависимости $K_{\mu} = f_1(\cos \varphi_2)$

Используя соотношение для определения x , с учетом выражения (14), значение σ исследуемого образца находим из формулы:

$$\sigma = \frac{E_{\Sigma 0}^2 K_{\sigma}}{\pi^2 d_n^2 f (E_{\Sigma 0}^2 - E_{\sigma n}^2 + E_{\Sigma 0}^2 (2\eta - 1))} 10^7 \text{ [СМ/М]}, \quad (15)$$

где $K_{\sigma} = x^2 K_{\mu}$ – универсальная функциональная зависимость, которая через обобщенный параметр x , однозначно связана с $\cos \varphi_2$. График функциональной зависимости $K_{\sigma} = f_2(\cos \varphi_2)$ приведен на рис. 5.

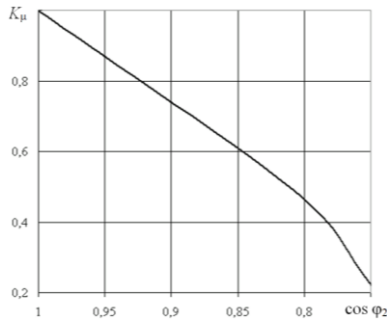


Рис. 5 – Графік залежності $K_{\sigma} = f_2(\cos \varphi_2)$

Последовательность измерительных и расчетных операций при реализации метода совместного бесконтактного определения μ_r и σ ферромагнитного цилиндрического образца с использованием ТЭМП, состоит в следующем. Вначале, для фиксированных значений частоты и амплитуды намагничивающего тока, а также известных геометрических параметров ТЭМП, измеряют значения напряжений E_{Σ} , $E_{\text{вн}}$ и $E_{\Sigma 0}$. Затем, с помощью выражения (13), находят значение $\cos \varphi_2$, а зависимостям $K_{\mu} = f_1(\cos \varphi_2)$ и $K_{\sigma} = f_2(\cos \varphi_2)$ определяют параметры K_{μ} и K_{σ} . Далее, используя выражения (14) и (15), определяют значения μ_r и σ соответственно.

Важной метрологической характеристикой электромагнитного преобразователя является его относительная чувствительность, т.е. степень изменения выходного сигнала от изменения входного параметра образца [10]. Удобно эту зависимость оценивать относительно параметра x , так как последний включает в себя геометрические и электромагнитные параметры образца, а также частоту зондирующего электромагнитного поля. Таким образом, используя выражение (6) с учетом (7) и (9), получим:

$$E_{\Sigma} = E_{\Sigma 0} \sqrt{(\mu_r \eta K)^2 + 2\eta(1-\eta)\mu_r K \cos \varphi_2 + (1-\eta)^2}, \quad (16)$$

а относительную чувствительность $S_{E_{\Sigma}}$ определим как

$$S_{E_{\Sigma}} = \frac{\partial E_{\Sigma}}{\partial x} = \frac{[\mu_r \eta K + (1-\eta) \cos \varphi_2] \frac{\Delta K}{\Delta x} + (1-\eta) K \frac{\Delta \cos \varphi_2}{\Delta x}}{\sqrt{(\mu_r \eta K)^2 + 2\eta(1-\eta)\mu_r K \cos \varphi_2 + (1-\eta)^2}}. \quad (17)$$

Аналогично, для определения $S_{E_{\text{вн}}}$, используя выражения (5), (7) и (8), получим:

$$E_{\sigma n} = \eta E_{\Sigma 0} \sqrt{(\mu_r K)^2 - 2\mu_r K \cos \varphi_2 + 1}, \quad (18)$$

$$S_{E_{\sigma n}} = \frac{\partial E_{\sigma n} / \partial x}{E_{\Sigma 0}} = \mu_r \eta \frac{[\mu_r K - \cos \varphi_2] \frac{\Delta K}{\Delta x} + K \frac{\Delta \cos \varphi_2}{\Delta x}}{\sqrt{(\mu_r K)^2 - 2\mu_r K \cos \varphi_2 + 1}}, \quad (19)$$

где K , $\cos \varphi_2$, ΔK , $\Delta \cos \varphi_2$ и Δx – значения обобщенных параметров и их приращений соответственно в рабочей точке ТЭМП.

Графики зависимостей относительных чувствительностей $S_{E_{\Sigma}}$ и $S_{E_{\text{вн}}}$ от x для двух значений коэффициента заполнения представлены на рис. 6 и 7.

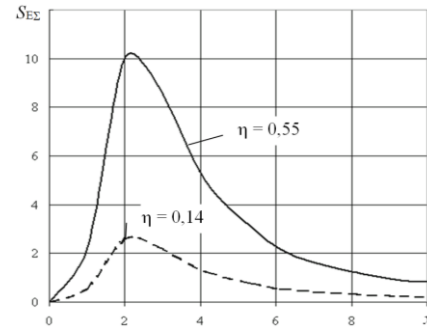


Рис. 6 – Графік залежності $S_{E_{\Sigma}} = f(x)$

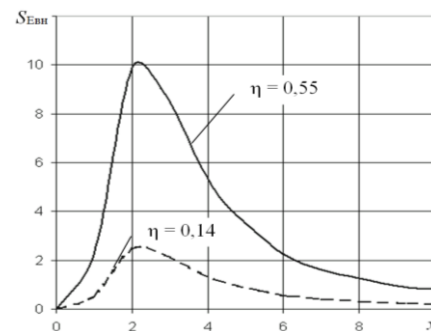


Рис. 7 – Графік залежності $S_{E_{\text{вн}}} = f(x)$

Обсуждение результатов

Результаты работы позволяют сделать вывод, что существует рациональный режим работы ТЭМП в диапазоне $1 \leq x \leq 3$, при котором относительная чувствительность ТЭМП максимальна [11, 12]. Это позволяет создавать промышленные устройства бесконтактного многопараметрового контроля физико-механических параметров металлических изделий и конструкций.

В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований амплитудным и фазовым методом контроля механического момента на валу. Следует отметить, что наблюдается линейность характеристики амплитуды выходного сигнала, что коррелируется с результатами расчетов механической деформации, которые оценены средствами и аппаратом функций теоретической механики. По полученным результатам можно сделать вывод, что данный метод позволяет бесконтактно контролировать реальное состояние деформированного объекта и при нарушении линейности выходной характеристики находить аномальные участки исследуемого объекта.

Таблица 1 – Экспериментальные результаты контроля механического момента на валу при $f = 400$ Гц; $I = 30$ мА; $E_{\Sigma 0} = 8$ мВ

Параметры	Ед. изм.	M, Нм					
		0	2	4	6	8	10
E_{Σ}	мВ	57,6	54,4	50,3	46,7	42,1	36,8
φ	град.	43,8	44,2	44,4	44,6	44,5	44,3
$E_{\text{вн}}$	мВ	55,3	52,8	46,2	43,9	40,2	33,4
μ_f	-	130	125	117	112	108	102
σ	10^7 См/м	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36	0,34

Выводы

Разработана физическая модель электромагнитного преобразователя с изделием, которое подвергается кручению, дано теоретическое обоснование на уровне доменной структуры исследуемого материала и электромагнитных явлений. Создана экспериментальная установка, получены результаты экспериментальных исследований влияния механического момента, вызванного кручением объекта, на его электромагнитные свойства. Предложены амплитудный и фазовый методы контроля механических напряжений.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований не противоречат ранее известным законам теоретической механики.

Список литературы

1. Клюев, В.В. Комбинированные методы вихрекового, магнитного и электропотенциального контроля / В.В. Клюев, П.Н. Шкагов. – М.: Издательский дом "Спектр", 2011. – 191 с.
2. Клюев, В.В. *Не разрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Т.6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля* / В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Горкунов Э.С., В.Е. Щербинин. – Москва: Машиностроение, 2004. – 832 с.
3. Бида, Г.В. Не разрушающий контроль механических свойств стального проката (обзор). Контроль прочностных и пластических свойств / Г.В. Бида // *Дефектоскопия*. – 2005. – №5. – С.39–53.
4. Hertlein, B. *Nondestructive testing of deep foundations* / B. Hertlein, A. Davis. WILEY publisher, 2006. – 290 p.
5. Аркадьев, В.К. *Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 1.* / В.К. Аркадьев – М.: Госэнергоиздат, 1934. – 230 с.
6. Горкунов, Б.М. Электромагнитный преобразователь для контроля напряженно-деформированного состояния узлов оборудования электропривода / Б.М. Горкунов, А.В. Кипенский, С.Г. Львов // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода*. – Кременчук, 2012. – Вип. 3/19. – С.182–185.
7. Горкунов, Б.М. Вихрековый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа // *Вестник НТУ "ХПИ"*, Харьков. – № 5. – 2004. – С. 93–99.
8. Двайт, Г.Б. *Таблицы интегралов и другие математические формулы* / Г.Б. Двайт. – М.: Наука, 1973. – 228 с.
9. Абрмовиц, М. *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами* /

под ред. М. Абрмовица и М. Стиган. – М.: Наука. – 1979. – 832 С.

10. Чинков, В. М. Основы метрології та вимірвальної техніки / Харківський політехнічний інститут, нац. техн. ун-т. – 2-ге вид., перероб. і доп. / В.М. Чинков. – Харків: НТУ "ХПИ", 2005. – 524 с.
11. Захаров, И.П. *Теория неопределенности в измерениях. Уч. пособие* / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш – Харьков. – 2002. – 256 с.
12. Горкунов, Б.М. Оптимизация работы электромагнитного преобразователя по частоте возбуждающего поля / Б.М. Горкунов, А.А. Авраменко, С.Г. Львов и др. // *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2014. – Т.2. – №9 (128). – С. 120–124.

References (transliterated)

1. Kljuev, V.V., Shkatov, P.N. *Kombinirovannye metody vihretokovogo, magnitnogo i jelektropotencial'nogo kontrolja* [Combined eddy current, magnetic, and electropotential control methods]. Moscow, Spekr Publ., 2011. 191 p.
2. Kljuev, V.V., Muzhickij, V.F., Gorkunov, Je.S., Shherbinin V.E. *Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: Magnitnye metody kontrolja* [Non-Destructive Testing: A Handbook: Magnetic control methods]. Moscow, Mashinostroenie, 2004. – vol. 6, Book 1, 832 p.
3. Bida, G.V. *Nerazrushayushchij kontrol mehanicheskikh svoystv stalnogo prokata (obzor). Kontrol prochnostnyih i plasticheskikh svoystv.* [Non-destructive testing of the mechanical properties of rolled steel (review). Control of strength and plastic properties] *Defektoskopiya*. No. 5. 2005. 39–53.
4. Hertlein, B., Davis, A. *Nondestructive testing of deep foundations*. WILEY publisher, 2006. – 290 p.
5. Arkadyev, V.K. *Elektromagnitnyie protsessy v metallah [Electromagnetic processes in metals]. Part 1.* – М.: Gosenergoizdat, 1934. – 230 p.
6. Gorkunov, B.M., Kipenskiy, A.V. and S.G. Lvov. *Elektromagnitnyiy preobrazovatel dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzlov oborudovaniya elektroprivoda* [Electromagnetic transducer to control the stress-strain state of the components of the electric drive equipment] *Elektromehanichnii i energozberigayuchi sistemi. Ser.: Problemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda*. No. 3.19. 2012. 182-185.
7. Gorkunov, B.M., Tyupa, I.V. *Vihretkovyyiy dvuhparametrovyyiy kontrol ferromagnitnyih tsilindricheskikh izdeliy* [Eddy-current two-parameter testing of ferromagnetic cylindrical bodies] *Vesnik NTU "KhPI"*, Kharkov. – №5. – 2004. 93–99.
8. Dwight, G.B. *Tablitsy integralov i drugie matematicheskie formulyi [Tables of integrals and other mathematical formulas]*. Moskow, Nauka Publ., 1973. 228 p.
9. Abrmovits, M., Stigan, M. *Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook for special functions with formulas, graphs and math tables]. Moskow, Nauka Publ., 1979. 832 p.
10. Chynkov, B.M. *Osnovy metrolohii ta vymiriuvanoi tekhniki / Kharkivskiy politekhnichnyi instytut, nats. tekhn. un-t.* – 2nd ed., pererob. i dop. - Kharkiv : NTU "KhPI", 2005. - 524 p.
11. Zakharov, I.P., Kukush, V.D. *Teoriya neopredelennosti v izmereniyah [The theory of uncertainty in measurements]*. Uch. allowance. – Kharkov. 2002. – 256 p.
12. Gorkunov, B.M., Avramenko, A.A., Lvov, S.G. *Optimizacija raboty jelektromagnitnogo preobrazovatelja po*

chastote vzbuzhdajushhego polja [Optimization of the electromagnetic transducer operation according to the frequency of the exciting field]. *Jenergosberezenie*.

Jenergetika. Jenergoaudit. 2014, vol. 2, no 9 (128), pp. 120-124.

Сведения об авторах (About authors)

Горкунов Борис Митрофанович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры информационно-измерительных технологии и систем, г. Харьков; ORCID 0000-0002-8175-858X; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua.

Boris Mitrofanovich Gorkunov – Doctor of Technical Sciences (Sc.D.), Professor, Professor Department of Data Measuring Technologies and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-8175-858X; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua.

Львов Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры информационно-измерительных технологии и систем, г. Харьков; ORCID 0000-0003-3830-0570; e-mail: lsg@kpi.kharkov.ua.

Sergij Gennadijovych Lvov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor Department of Data Measuring Technologies and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0003-3830-0570; e-mail: lsg@kpi.kharkov.ua.

Салиба Абдель Нур – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры информационно-измерительных технологий и систем, г. Харьков; ORCID 0000-0002-6954-3754; e-mail: abdel.nour.saliba@gmail.com.

Abdel Nour Saliba – postgraduate Department of Data Measuring Technologies and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-6954-3754; e-mail: abdel.nour.saliba@gmail.com.

Шахин Иссам – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры технической электрохимии, г. Харьков; e-mail: dr.issamchahine@hotmail.com

Issam Chahine – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor Department of Technical Electrochemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: dr.issamchahine@hotmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Горкунов, Б. М. Зависимость продольной магнитной проницаемости и поперечной электропроводности от механических нагрузок на валу / **Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, Салиба Абдель Нур, Иссам Шахин** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 116-121. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.16.

Please cite this article as:

Gorkunov, B., Lvov, S., Nour, S., Chahine, I. Dependence of longitudinal magnetic permeability and transverse conductivity on mechanical loads on the shaft. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 20 (1345), 116-121, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.16.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Горкунов, Б. М. Залежність подовжньої магнітної проникності і поперечної електропровідності від механічних навантажень на валу / **Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, Салиба Абдель Нур, Иссам Шахин** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: *"Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"*. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 116-121. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.16.

АНОТАЦІЯ. В роботі розглянуто трансформаторний вихрострумний перетворювач, включений за диференційною схемою, і запропоновано метод контролю механічної напруги в металевих циліндричних виробках в реальному часі. На основі наявності кореляційних зв'язків між електромагнітними характеристиками металів та їх структурним станом запропонований метод безконтактного контролю механічної деформації виробів. Обрано узагальнений нормований інформативний магнітний параметр і на його основі отримані основні функції перетворення для визначення змін відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності навантажених виробів щодо стандартного зразка. Показана можливість використання диференціального методу для збільшення чутливості контролю механічних параметрів циліндричних виробів. Розроблено фізичну модель електромагнітного перетворювача з виробом, який піддається крученню, дано теоретичне обґрунтування на рівні доменної структури досліджуваного матеріалу і електромагнітних явищ. Створена експериментальна установка, отримані результати експериментальних досліджень впливу механічного моменту, викликаного крутінням об'єкта, на його електромагнітні властивості. Запропоновано амплітудний і фазовий методи контролю механічних напружень. Результати робіт дозволяють зробити висновок, що існує раціональний режим роботи перетворювача в діапазоні $1 \leq \xi \leq 3$, при якому для $\eta = 0,38$ похибки визначення $\gamma_{\text{пр}}$ і $\gamma_{\text{б}}$ не перевищують 1% і 3% відповідно. Слід зауважити, що в цьому ж діапазоні зміни x відносна чутливість перетворювача максимальна. Це дозволяє створювати промислові пристрої безконтактного багатопараметрового контролю фізико-механічних параметрів металевих виробів і конструкцій. Отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень не суперечать раніше відомим законам теоретичної механіки, що дозволяє широко застосовувати їх в практиці неруйнівного контролю.

Ключові слова: трансформаторний вихрострумний перетворювач; диференціальна схема; контроль механічної деформації; відносна магнітна проникність; питома електрична провідність

Надійшла (received) 05.07.2019