

ВИХРЕТОКОВЫЙ ПЕРЕМЕННО-ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Б. М. Горкунов, Н. Н. Сиренко, С. Г. Львов, А. А. Тищенко, Аббаси Жаббар
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Аннотация. Рассмотрены два метода определения усилий и механических напряжений в цилиндрических изделиях трансформаторным проходным электромагнитным преобразователем с частотным выходом на основе постоянства амплитуды и фазы ЭДС, наводимой на концах измерительной обмотки преобразователя. Основным достоинством обоих частотных методов является их высокая разрешающая способность при измерениях механических напряжений.

Ключевые слова: механические напряжения, амплитудный метод, фазовый метод, частотный метод, трансформаторный электромагнитный преобразователь, магнитная проницаемость, удельная электрическая проводимость.

Введение

В настоящее время широкое развитие приобретают электромагнитные многопараметровые методы контроля материалов и изделий [1-3]. Особый практический интерес представляет использование этих методов для совместного определения электрических и магнитных величин [4-6] проводящих изделий, по которым можно судить о прочностных параметрах, твердости, механических напряжениях, температуре, доминирующих примесях и т.д. В работах [7,8] описаны различные типы преобразователей (трансформаторных, параметрических, анизотропных и др.) со сплошным и шихтованным магнитопроводом, основанных на магнитоупругом эффекте. Однако теория работы и методики расчетов слабо разработаны, особенно при использовании их в широких диапазонах изменения частоты и напряженности магнитного поля. В этом плане целесообразно использование электромагнитных преобразователей с цилиндрическим сплошным изделием, поскольку в данном случае уже определены функциональные связи между сигналами преобразователя и изделием при отсутствии механического напряжения. Тем не менее, представляет интерес дальнейшее развитие электромагнитных методов и реализующих их преобразователей в направлении различных практических приложений и, в частности, для определения механических напряжений, усилий, веса грузов, давлений, моментов и др.

В настоящей работе рассмотрены амплитудный и фазовый частотные методы для определения усилий и механических напряжений в цилиндрических сплошных проводящих изделиях

© Горкунов Б.М., Сиренко Н.Н., Львов С.Г.,
Тищенко А.А., Аббаси Жаббар 2017

при зондировании их переменным магнитным полем.

1. Амплитудный и фазовый частотные методы для определения усилий и механических напряжений

Воспользовавшись результатами работ [1-5], приведем выражение для амплитуды K и фазы φ удельной нормированной эдс трансформаторного электромагнитного преобразователя ТЭМП при помещении в него цилиндрического проводящего изделия:

$$K = \frac{E_2}{E_0 \eta \mu_r} = \frac{2}{x} \sqrt{\frac{\text{ber}_1^2 x + \text{bei}_1^2 x}{\text{ber}_0^2 x + \text{bei}_0^2 x}} \quad (1)$$

$$\text{tg} \varphi = \frac{\text{bei}_1 x (\text{ber}_0^2 x + \text{bei}_0^2 x) + \text{ber}_1 x (\text{ber}_0^2 x - \text{bei}_0^2 x)}{\text{bei}_1 x (\text{ber}_0^2 x - \text{bei}_0^2 x) - \text{ber}_1 x (\text{ber}_0^2 x + \text{bei}_0^2 x)} \quad (2)$$

где E_2 и E_0 – ЭДС измерительной обмотки ТЭМП, обусловленной магнитными потоками в изделии и в преобразователе без изделия; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала изделия; η – коэффициент заполнения; $\eta = a^2/a_c^2$; a и a_c – радиусы изделия и измерительной обмотки ТЭМП; $\text{ber}_0 x$, $\text{bei}_0 x$, $\text{ber}_1 x$ и $\text{bei}_1 x$ – функции Кельвина нулевого и первого порядков от аргумента x (обобщенный параметр)

$$x = a \sqrt{2\pi \mu_0 \mu_r \sigma f} \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; σ – удельная электрическая проводимость, ω – циклическая частота; $\omega = 2\pi f$; f – частота изменения поля.

Из формул (1), (2) следует, K и $\text{tg} \varphi$ являются функциями одной переменной x , которая, в свою очередь, зависит от μ_r и σ при постоянной частоте ω . Естественно, появление в изделии механического напряжения может приводить в общем

случае к изменению как значений μ_r , так и σ . Отсюда будут изменяться параметры K и $\operatorname{tg} \varphi$, а, следовательно, можно применить амплитудный и фазовый методы при использовании соответственно функций $K = f(x)$ и $\operatorname{tg} \varphi = f(x)$ [3,5].

Для этого необходимо при фиксированной частоте поля f измерить амплитуду E_Σ и фазу φ_0 суммарной ЭДС, наводимой на концах измерительной обмотки ТЭМП, а затем установить экспериментально для каждого, изделия зависимости суммарной ЭДС и ее фазы от механического напряжения $\sigma_m = P/S$ (где P – усилие, растягивающее изделие, S – площадь поперечного сечения образца). Таким образом, амплитудный метод характеризуется функцией $E_\Sigma = f(\sigma_m)$, а фазовый метод – зависимостью $\varphi_0 = f(\sigma_m)$. Как показывают результаты экспериментов, оба эти метода обладают сравнительно низкой разрешающей способностью, т.е. в используемом диапазоне изменения σ_m (от 0 МПа до 19 МПа) величины E_Σ и φ_0 изменяются в пределах 200÷230 мВ и 22÷24 град. Отсюда следует, что целесообразно на практике использовать эти методы для измерения больших механических напряжений σ_m , поскольку в этом случае сигналы ТЭМП с нагружаемым изделием существенно отличаются от сигналов, когда образец не нагружен.

С целью повышения разрешающей способности ТЭМП при измерении величин σ_m в широком диапазоне их изменения удобно использовать частотные амплитудный и фазовый методы. Суть обоих методов состоит в том, что сначала в отсутствие нагружения изделия устанавливают значение частоты зондирующего поля, соответствующее максимальной крутизне характеристики $K = f(x)$ или $\operatorname{tg} \varphi = f(x)$, которая наступает при $1,5 < x < 3$. Для того, чтобы удовлетворить последнему условию нужно при любой частоте измерить E_Σ , E_0 и φ_0 , а затем найти тангенс фазового угла параметра K по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_\Sigma \sin \varphi_0}{E_\Sigma \cos \varphi_0 - E_I},$$

где E_I – часть ЭДС E_Σ , обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре между изделием и измерительной обмоткой;

$$E_I = E_0(1 - \eta).$$

После этого, пользуясь зависимостью $\operatorname{tg} \varphi = f(x)$, полученной в виде массива точек с шагом $x = 0,05$ на основе справочных данных по *ber-*, *bei-* функциям [9], находят значение x . Если же это значение не попадает в диапазон $1,5 < x < 3$, то изменяют частоту поля до тех пор,

пока это условие не выполнится. В этом случае фиксируют частоту f_0 и регистрируют значения E_Σ^* , и φ_0^* , соответствующие отсутствию механического напряжения в изделии. Далее при каждом фиксированном механическом нагружении образца дискретно изменяют частоту магнитного поля до равенства значения $E_\Sigma = E_\Sigma^*$ или $\varphi_0 = \varphi_0^*$. В итоге строят зависимость $f = f(\sigma_m)$ при $E_\Sigma = \operatorname{const}$ (амплитудно-частотный метод) или $f = f(\sigma_m)$ при $\varphi_0 = \operatorname{const}$ (фазово-частотный метод).

Измеренные величины E_Σ^* , E_0 и φ_0^* дают возможность при реализации обоих методов определять совместно относительную магнитную проницаемость μ_r и удельную электрическую проводимость σ при различных механических напряжениях (или усилиях, растягивающих изделие). Результаты таких измерений позволяют получить сведения о том, как влияют механические напряжения на продольную (вдоль изделия) магнитную проницаемость и поперечную удельную электрическую проводимость.

Для определения такой магнитной проницаемости необходимо после того, как определили x , выполнив условие $1,5 < x < 3$, найти, пользуясь зависимостью $K = f(x)$, значение K (при этом $K = f(x)$ предоставляется в виде табличных данных [9]).

Далее величину μ_r определяют из соотношения

$$\mu_r = \frac{\sqrt{E_\Sigma^{*2} + E_I^2 - 2E_\Sigma E_I \cos \varphi_0}}{E_0 \eta K}.$$

Значение σ находят, исходя из (3), по формуле

$$\sigma = \frac{x^2}{2\pi a^2 \mu_0 \mu_r f}.$$

На рис. 1 представлена схема установки, реализующей амплитудно-частотный и фазо-частотный методы. Она включает в себя генератор синусоидальных сигналов Γ , амперметр A , частотомер f , рабочий РП и опорный ОП преобразователи, вольтметры $B1$ и $B2$, фазометр Φ . РП и ОП являются идентичными преобразователями. В РП помещен образец O , на который воздействует усилие P . Первичные обмотки РП и ОП включены последовательно-согласно. Вольтметр $B1$ измеряет значение E_Σ , вольтметр $B2$ – E_0 , фазометр Φ регистрирует фазовый угол φ_0 , а частотомер f значения частоты при каждом нагружении образца.

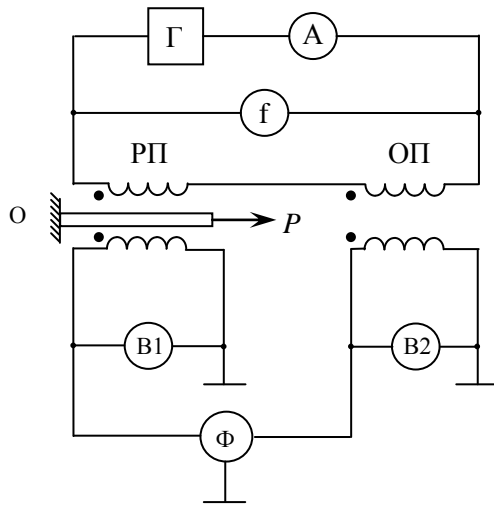


Рис. 1. Схема установки, реализующей амплитудно-частотный и фазово-частотный методы

2. Экспериментальные исследования

Эксперименты проводились на преобразователях РП и ОП с параметрами: число витков первичной и вторичной обмоток $W_1 = 320$; $W_2 = 450$; $a_c = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м, длина первичной обмотки $l_c = 0,084$ м. Параметры образца: сталистая проволока (прошедшая отжиг), $a = 0,75 \cdot 10^{-3}$ м; длина $l \gg l_c$, $l = 0,25$ м.

РП располагался вертикально, внутри него размещалась проволока (образец), верхний конец которой закреплялся на консольной балке, а на нижней подвешивались мерные грузы весом до 5 кг, которые создавали механические напряжения в образце.

На рис. 2 а,б представлены зависимости $f = f(\sigma_m)$ при $E_\Sigma = \text{const}$ (амплитудно-частотный метод) или $f = f(\sigma_m)$ при $\varphi_0 = \text{const}$ (фазово-частотный метод). При этом выбиралось значение частоты f в отсутствие нагружения равной 1000 Гц, что для используемого образца соответствовало $x = 2$.

Рис. 2 а, б показывает, что амплитудно-частотный метод позволяет получить более высокую разрешающую способность, чем фазово-частотный метод (при реализации первого метода средняя разрешающая способность 35 Гц/МПа, а при фазово-частотном 30 Гц/МПа).

В табл. 1 и 2 приведены зависимости μ_r и σ от σ_m при реализации амплитудно-частотного и фазово-частотного методов.

Данные этих таблиц свидетельствуют о том, что изменения значений $\Delta\mu_r$, продольной магнитной проницаемости и $\Delta\sigma$ поперечной удельной электрической проводимости во всем диапазоне $0 < \sigma_m < 10$ МПа составляет соответственно $\Delta\mu_r = 207$ и $\Delta\sigma = 0,5$ МСм/м, т.е. на 34% и 5% для амплитудно-частотного метода; а для фазово-

частотного метода $\Delta\mu_r = 200$; $\Delta\sigma = 0,7$ МСм/м (или 34% и 8%) в том же диапазоне изменения σ_m .

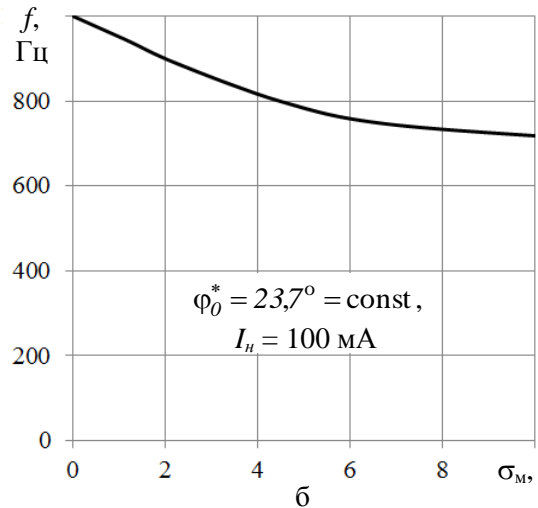
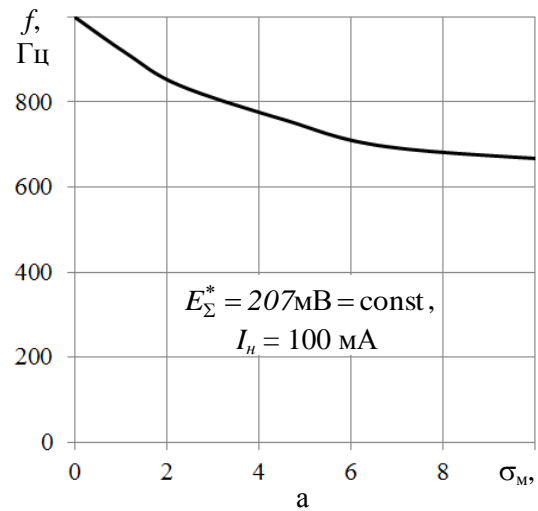


Рис. 2. Зависимости частоты сигнала от механических напряжений: а – при $E_\Sigma = \text{const}$ (амплитудно-частотный метод); б – при $\varphi_0 = \text{const}$ (фазово-частотный метод)

Таблица 1
Зависимости μ_r и σ образца от σ_m при реализации амплитудно-частотного метода

$$E_\Sigma^* = 207 \text{ мВ} = \text{const}, I_n = 100 \text{ мА}$$

σ_m , МПа	f , Гц	φ_0 , град	E_0 , мВ	E_2 , мВ	φ , град	x	μ_r	σ , МСм/м
0	1000	23,60	16,2	193	25,45	2,087	390	8,9
1,13	914	23,45	14,8	194	25,12	2,066	427	8,85
2,26	840	23,41	13,6	195	24,94	2,055	466	8,72
4,53	759	23,38	12,3	196	24,75	2,044	517	8,59
6,79	695	23,34	11,2	197	24,59	2,034	565	8,48
11,32	658	23,28	10,6	198	24,45	2,026	597	8,40

Таблица 2
Зависимости μ_r и σ образца от σ_m при реализации
фазово-частотного метода $\varphi_0^* = 23,7^\circ = \text{const}$,
 $I_n = 100 \text{ мА}$

σ_m , МПа	f , Гц	E_Σ , мВ	E_0 ,	E_2 , мВ	φ , град.	x	μ_r	σ , МСм/ м
0	1000	206	16,2	192	25,57	2,094	389	9,80
1,13	945	212	15,3	199	25,41	2,084	425	8,74
2,26	888	214	14,3	201	25,28	2,076	457	8,55
4,53	798	215	12,9	204	25,10	2,065	513	8,38
6,79	746	217	12,1	206	25,00	2,059	555	8,21
11,32	708	218	11,4	208	24,92	2,054	589	8,11

Выводы

Таким образом, в работе рассмотрены два частотных метода, позволяющих существенно увеличить разрешающую способность трансформаторного преобразователя при определении усилия или механического напряжения в цилиндрическом ферромагнитном изделии, помещенном в преобразователь.

Установлены также зависимости продольной магнитной проницаемости и поперечной удельной электрической проводимости от механического напряжения. Погрешности измерений механических усилий рассмотренными методами не превышают 2%.

Оба метода использовались при создании несоизмерительной аппаратуры, обладающей простой функцией преобразования и конструкцией элементов, а также высокой чувствительностью к изменению механических напряжений.

Данные методы также нашли применение в установках (в том числе и автоматизированных) для изучения воздействия механических напряжений, деформации на электрические и магнитные параметры нагружаемых изделий и образцов, выполненных из различных материалов (ферромагнитных и немагнитных).

Список использованной литературы

1. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами [Текст] / Герасимов В. Г., Останин Ю. Я., Покровский А. Д. и др. – Москва: Энергия, 1978. – 215 с.
2. Ключев, В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий [Текст]: справочник. Кн.2 / под ред. В. В. Ключева. – 2-е изд. – Москва: Машиностроение, 1986. – 352 с.
3. Определение электромагнитных характеристик материала сплошных цилиндрических изделий [Текст] / Баштанников Л. А., Бондаренко

В. И., Себко В. П., Тюпа В. И. // Дефектоскопия. – 1980. – №8. – С. 5–9.

4. Гончаров, Б. В. Теория и практика безэталонных электромагнитных методов контроля [Текст] / Б. В. Гончаров. – Москва: Машиностроение, 1975. – 40 с.

5. Бесконтактное измерение электромагнитных характеристик цилиндрических изделий [Текст] / Бондаренко В. М., Горкунов Б. М., Себко В. П. и др. // Измерительная техника. – 1984. – № 6. – С.57–58.

6. Сандовский, В. А. Исследование возможности разбраковки прутковой стали по маркам методом вихревых токов в двухпараметровом варианте [Текст] / В. А. Сандовский, Н. И. Носальская // Дефектоскопия. – 1983. – № 6. – С. 30–34.

7. Новицкий, П. В. Электрические измерения неэлектрических величин [Текст] / под ред. П. В. Новицкого. – Ленинград: Энергия, 1975. – 576 с.

8. Гуманюк, М. Н. Магнитоупругие датчики в автоматике [Текст] / М. Н. Гуманюк. – Киев: Техника, 1972. – 260 с.

9. Абрамович, М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами [Текст] / под ред. М. Абрамовича, И. Стиган. – Москва: Наука, 1979. – 832 с.

References

1. Gerasimov, V. G., Ostanin, Y. Y., Pokrovskiy, A. D. (1978), *Non-destructive control of quality of products by electromagnetic methods [Nerazrushayuschiy kontrol kachestva izdeliy elektromagnitnyimi metodami]*, Energiya, Moscow, 215 p.
2. Klyuev, V. V. (1986), *Devices for nondestructive testing of materials and products: directory. Vol.2 [Priboryi dlya nerazrushayuschego kontrolya materialov i izdeliy: spravochnik. Kn.2]*, Mashinostroenie, Moscow, 352 p.
3. Bashtannikov, L. A., Bondarenko, V. I., Sebko, V. P., Tyupa, V. I. (1980), "Determination of the electromagnetic characteristics of the material of solid cylindrical products" ["Opredelenie elektromagnitnykh harakteristik materiala sploshnykh tsilindricheskikh izdeliy"], *Defektoskopiya*, No. 8, pp. 5–9.
4. Goncharov, B. V. (1975), *Theory and practice of non-standard electromagnetic methods of control [Teoriya i praktika bezetalonnykh elektromagnitnykh metodov kontrolya]*, Mashinostroenie, Moscow, 40 p.
5. Bondarenko, V. M., Gorkunov, B. M., Sebko, V. P. (1984), "Non-contact measurement of electromagnetic characteristics of cylindrical products" ["Beskontaktnoe izmerenie elektromagnitnykh

характеристик tsilindricheskikh izdeliy"], *Izmeritel'naya tekhnika*, No. 6, pp. 57–58.

6. Sandovskiy, V. A. (1983), "Research of possibility of sorting steel bar by brands using eddy currents method in a two-parameter version" ["Issledovanie vozmozhnosti razbrakovki prutkovoy stali po markam metodom vihrevyih tokov v dvuhparametrovom variante"], *Defektoskopiya*, No. 6, pp. 30–34.

7. Novitskiy, P. V. (1975), *Electrical measurements of non-electrical values [Elektricheskie*

izmereniya neelektricheskikh velichin], Energiya, Leningrad, 576 p.

8. Gumanyuk, M. N. (1972), *Magnetoelastic sensors in automation [Magnitoupругie datchiki v avtomatike]*, Tekhnika, Kiev, 260 p.

9. Abramovits, M., Stigan, I. (1979), *Directory of special functions with formulas, graphs and tables [Spravochnik po spetsialnyim funktsiyam s formulami, grafikami i tablitsami]*, Nauka, Moscow, 832 p.

EDDY-CURRENT VARIABLE-FREQUENCY METHOD OF DETERMINATION MECHANICAL STRESS

B. M. Gorkunov, N. N. Sirenko, S. G. Lvov, A. A. Tyshchenko, Abbasi Jabbar
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Abstract. *Using of multiparameter electromagnetic control methods of materials and products for controlling the electrical and magnetic fields of conductive products, which can be used to determine the strength parameters, hardness, mechanical stresses, temperature, and prevailing impurities, is practical interest. The expediency of using electromagnetic transducers with a cylindrical solid product, because in this case the functional connections between the signals of the converter and the product have been determined in the absence of a mechanical stress, is shown. In the paper, further development of electromagnetic methods and implementing converters in the direction of various practical applications and, in particular, for the determination of mechanical stresses, forces, weight of loads, pressures, moments, etc., is considered. Applying the functional dependences of the amplitude and phase of the specific normalized emf of the transformer converter with a cylindrical ferromagnetic product, amplitude and phase frequency methods for determining the mechanical stresses are proposed. The emergence of mechanical stress in the product can result in general to a change in both the values of the magnetic permeability and the specific electric conductivity.*

In order to increase the resolving power of a transformer electromagnetic converter when measuring the magnitude of the mechanical stress in a wide range of their variations, the frequency amplitude and phase methods should be used. The essence of both methods is that first, in the absence of a mechanical stress of the product, the value of the frequency of the probe field is defined, corresponding to the maximum steepness of the transformation function, which sets in at $1.5 < x < 3$. The errors in measuring the mechanical forces by these methods don't exceed 2%. Both methods were used in the developing of weighing apparatus which having simple conversion function, the design of the elements and high sensitivity to the change in mechanical stresses. These methods also have found application in installations for research of influence of mechanical stresses, deformation on electric and magnetic parameters of products and the samples made of various materials.

Key words: *Mechanical stresses, amplitude method, phase method, frequency method, transformer electromagnetic transducer, magnetic permeability, specific electrical conductivity.*

ВИХРОСТРУМОВИЙ ЗМІННО-ЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ НАПРУГ

Б. М. Горкунов, М. М. Сіренко, С. Г. Львов, А. А. Тищенко, Аббасі Жаббар
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. *Розглянуто два методи визначення зусиль і механічної напруги в циліндричних виробках трансформаторних прохідним електромагнітним перетворювачем з частотним виходом на основі постійності амплітуди і фази ЕРС, що наводиться на кінцях вимірювальної обмотки перетворювача. Основною перевагою обох частотних методів є їх висока роздільна здатність при вимірах механічної напруги.*

Ключові слова: механічні напруги, амплітудний метод, фазовий метод, частотний метод, трансформаторний електромагнітний перетворювач, магнітна проникність, питома електрична провідність.

Получено 19.04.2017



Горкунов Борис Митрофанович, доктор технических наук, профессор кафедры информационно-измерительных технологий и систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина

E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua, тел.: +38 050 2813879

Gorkunov Boris, ScD., professor of the Department «Information and measuring technologies and system» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-8175-858X



Сиренко Николай Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры приборов и методов неразрушающего контроля Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина

E-mail: sirnn2@gmail.com, тел.: +38(057)7076934

Sirenko Nicholay, PhD., professor of the Department «Equipment and systems of the nondestructive inspection» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-5052-2750



Львов Сергей Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительных технологий и систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина

E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua, тел.: +38 095 3939400

Lvov Sergey, PhD., associate professor of the Department «Information and measuring technologies and system» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-3830-0570



Тищенко Анна Анатольевна, старший преподаватель кафедры электрических станций Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина

E-mail: ant_31@mail.ru, тел.: +38 095 7514943

Tyshchenko Anna, PhD., senior lecturer of the Department «Electric power plant» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-2825-1376



Аббаси Жаббар, аспирант кафедры информационно-измерительных технологий и систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичова, 2, Харьков, Украина

E-mail: abbassi.jabbar1@gmail.com, тел.: +38(057)7076934

Abbasi Jabbar, postgraduate of the Department «Information and measuring technologies and system» National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-6138-0014