

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКОВОГО ЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В РЕЖИМІ ЗБУДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ

К.Л. Ноздрачова¹, А.Ю. Слободчук²

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: nozdrachova@gmail.com

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: antonslobodchuk@gmail.com

Анотація

Розроблено математичну модель ємнісного ультразвукового перетворювача, призначеного для випромінювання ультразвукових коливань в електропровідний виріб. Розглянуто вплив поляризованого електростатичного поля по формуванню сил Кулона в поверхневому шарі металевго зразка. Отримано замкнутий розв'язок задачі електростатики для кусково-однорідного середовища, в якій напівпростір заповнений металом з кінцевими значеннями електричної провідності і магнітної проникності. Отримано вираз для розрахунку поверхневої щільності статичного електричного заряду на поверхні металевго зразка. Виявлено основні впливаючі фактори, що визначають просторовий розподіл щільності зарядів на поверхні виробу, які будуть формувати діаграму спрямованості і потужність випромінюючого ультразвукового поля. В рамках математичної моделі сенсора ємнісного типу в режимі перетворення електричної енергії в високочастотну механічну (ультразвукову) в металах побудовані замкнуті рішення задач електростатики та електродинаміки для кусково-однорідного середовища, в якій напівпростір заповнений металом з кінцевими значеннями електричної провідності і магнітної проникності. Показано, що дисковим перетворювачем ємнісного типу збуджуються сили, що діють нормально поверхні електропровідного виробу. Виконана кількісна оцінка поверхневої щільності сил Кулона. Встановлено основні фактори, що визначають чутливість дискового перетворювача ємнісного типу.

Ключові слова: ємнісний перетворювач, поверхнева щільність сил Кулона, збудження ультразвукових хвиль поверхневими навантаженнями, амплітудний множник радіально поширюючої хвилі Релея, хвильова характеристика перетворювача в режимі випромінювання.

У переважній більшості випадків застосування традиційних високочастотних методів ультразвукових вимірювань використовують контактний метод (із застосуванням контактної рідини, яку розміщують між електроакустичним перетворювачем і об'єктом досліджень) [1]. При контролі контактним методом поверхню виробу покривають в'язкою, добре змочуючою рідиною (машинним або трансформаторним маслом, гліцериним і ін.). При цьому необхідно зачищати поверхню введення / прийому ультразвуку об'єкта від забруднень, окалини, фарби, пластикових і інших покриттів [1]. Тобто підготовка поверхні об'єкта досліджень (ОД) і значні витрати контактної рідини вимагають значних матеріальних і економічних витрат [2]. Слід зазначити, що деякі матеріали не допускають застосування контактної рідини [1].

У істотній мірі зменшити недоліки традиційних методів вимірювань можливо за рахунок застосування безконтактних способів збудження і прийому високочастотних ультразвукових імпульсів [3, 4] (без застосування контактної рідини), серед яких найбільш відомими є електромагнітно - акустичний [3] і ємнісний [4]. Електромагнітно - акустичний спосіб реалізується за рахунок застосування магнітного і електромагнітного полів, а ємнісний - використовує електричне поле. В даній роботі буде розглядатися саме ємнісний метод ультразвукового контролю, як один із перспективних методів.

Мета роботи – математичне моделювання та експериментальне підтвердження ефективності перетворення енергії електричного поля в ультразвукові коливання різних типів хвиль.

Результати раніше виконаних досліджень.

В роботі [5] автори показали, що побудова базової математичної моделі ємнісного перетворювача (ЄП) в режимі збудження ультразвукових хвиль поділяється на дві основні задачі, що послідовно вирішуються. Перша задача - це задача електродинаміки за визначенням сил Кулона на поверхні металевго зразка, що формуються ЄП. Друга задача - це гранична задача динамічної теорії пружності про збудження гармонійних хвиль системою поверхневих навантажень, створюваних ЄП.

При вирішенні першого завдання [5] отримано вираз для розрахунку поверхневої щільності електричних зарядів на поверхні електропровідного зразка в статичному наближенні, яка визначає сили Кулона, що діють на поверхню ОД. При цьому показано, що, на відміну від традиційного уявлення, заряди концентруються не тільки під електродом ЄП. Це важливо для формування параметрів ультразвукового поля в досліджуваному об'єкті і, відповідно, результатів вимірювань і діагностики.

У статті [6] вирішена друга частина задачі, поставленої в [5], в обмеженні збудження тільки хвиль поздовжнього типу, і підтверджено експериментально наявність щільності зарядів на значній відстані від проекції електрода ЄП на поверхню ОД.

У той же час в промисловості потрібні швидкодіючі продуктивні засоби і технології для вимірювань, контролю та діагностики виробів із значними площами поверхні: ємностей, трансформаторів великої потужності, листів, труб великого діаметра, заготовок і ін. Забезпечити такі технології можливо шляхом за-

стосування поверхневих хвиль, що збуджуються безконтактно.

Зміст, аналіз і результати досліджень.

Узагальнена схема побудови ЄП в режимі збудження ультразвукових хвиль приведена на рис. 1. Перетворювач являє собою металевий електрод 1 довільної форми, який розташований на деякій відстані від поверхні металевого зразка 2. На металевий електрод подається постійний в часі електричний потенціал U_0 , який формує на поверхні $x_3 = 0$ металевого зразка електричний заряд з поверхневою щільністю $\sigma^0(x_1, x_2)$, де x_1, x_2, x_3 – координатні лінії правовинтової декартової системи координат, початок якої розташовується на поверхні металевого зразка.

Одночасно з постійним потенціалом U_0 на металевий електрод подається змінюючися в часі за гармонійним законом $e^{i\omega t}$ ($i = \sqrt{-1}$; ω – циклічна частота; t – час) електричний потенціал з амплітудним значенням U^* . Цей потенціал створює змінне електричне поле з напруженістю $\vec{E}^* e^{i\omega t}$ (\vec{E}^* – амплітуда вектора напруженості змінного електричного поля).

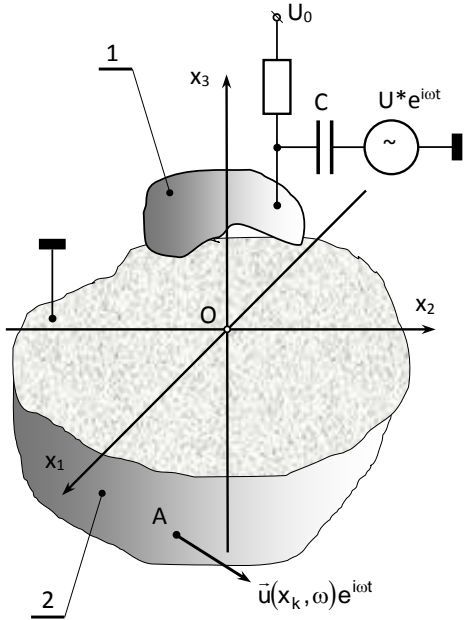


Рис. 1. Розрахункова схема електроакустичного перетворювача ємнісного типу в режимі збудження ультразвукових хвиль в металевому зразку

Припустимо, що виконується нерівність $U^* \ll U_0$. Тоді поверхневі заряди, які створюються змінним електричним полем, можна не брати до уваги. В такому випадку змінне електричне поле лінійно взаємодіє зі статичним електричним зарядом, в результаті чого на поверхні $x_3 = 0$ металевого зразка виникають сили Кулона з поверхневою щільністю $\sigma_{3j}^*(x_1, x_2, t)$, ($j = 1, 2, 3$), які визначаються наступним чином

$$\sigma_{3j}^*(x_1, x_2, t) = \sigma^0(x_1, x_2) E_j^*(x_1, x_2, 0) e^{i\omega t}, \quad (j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

де $E_j^*(x_1, x_2, 0)$ – амплітудні значення компонентів вектора напруженості змінного електричного поля на поверхні $x_3 = 0$ металевого зразка.

За допомогою інтегральних перетворень виведено вираз для розрахунку амплітудного множника релеевської хвилі, яка збуджується дисковим перетворювачем ємнісного типу

$$A_R(\omega) = -i A_0 W(\Omega), \quad (2)$$

де $A_0 = \pi \sigma_0 R f(v)/(2G)$ абсолютна чутливість дискового перетворювача ємнісного типу радіуса R в режимі збудження радіально поширюючихся хвиль Реллея. При середньому значенні модуля зсуву сталей $G = \sqrt{79 \cdot 89} \text{ ГПа} = 83,85 \text{ ГПа}$ при навантаженні $\sigma_0 = 88,5 \text{ Па}$ і $R = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ розмірна величина $A_0 = 4,75 \cdot 10^{-12} \text{ м}$. Символом $W(\Omega)$ ($\Omega = \gamma_R R$ безрозмірне хвильове число або, що те ж саме, безрозмірна частота, оскільки $\gamma_R R = \omega (R/v_R) = \omega \tau_0$) у формулі (2) позначена частотно залежна функція такого змісту

$$W(\Omega) = \Omega \int_0^{\infty} \xi \tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi) J_0(\Omega \xi) d\xi, \quad (3)$$

де $\xi = \rho / R$ – безрозмірна радіальна координата; $\tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi)$ – безрозмірна, що залежить від безрозмірної радіальної координати. Як випливає з представлених на рис. 2 в статті [6] графіків, основний внесок в числові значення інтеграла (3) дають значення функції $\tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi)$ на інтервалі $0 \leq \xi \leq 1$. Тому для виконання практичних обчислень вираз (3) необхідно записати в наступному вигляді

$$W(\Omega) \cong \Omega \int_0^1 \xi \tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi) J_0(\Omega \xi) d\xi. \quad (4)$$

Перш ніж обговорювати результати обчислень за формулою (4), розглянемо більш прості (модельні) ситуації.

Розглянемо наближення, при якому поверхнева щільність сил Кулона не змінюється в межах площадки $0 \leq \rho \leq 1, R$, тобто

$$\tilde{\sigma}_{zz}^*(\xi) = \begin{cases} 1 \forall \xi \leq 1,5; \\ 0 \forall \xi > 1,5. \end{cases}$$

При такому завданні поверхневої густини сил Кулона інтеграл (4) елементарно обчислюється аналітично і функція $W(\Omega) = J_1(\Omega)$. Графік цієї функції показаний на рис. 2.

Аналіз даних наведених на рис.2 показує, що функція $W(\Omega)$ має локальні максимуми, рівні яких монотонно зменшуються в міру збільшення безрозмірного хвильового числа Ω або безрозмірної частоти $\omega \tau_0$, де $\tau_0 = R/v_R$ – часовий масштаб. Особливо необхідно підкреслити, що на певних частотах функція $W(\Omega)$ звертається в нуль, тобто зовнішні сили діють

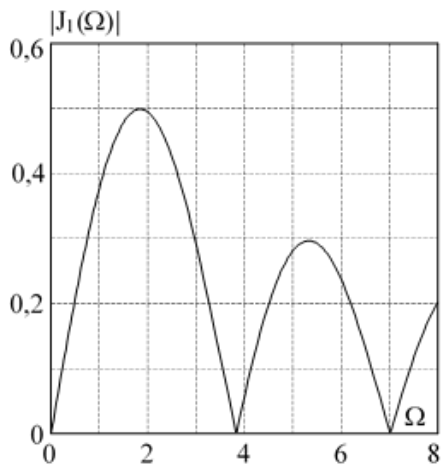


Рис. 2 Графік модуля функції $J_1(\Omega)$

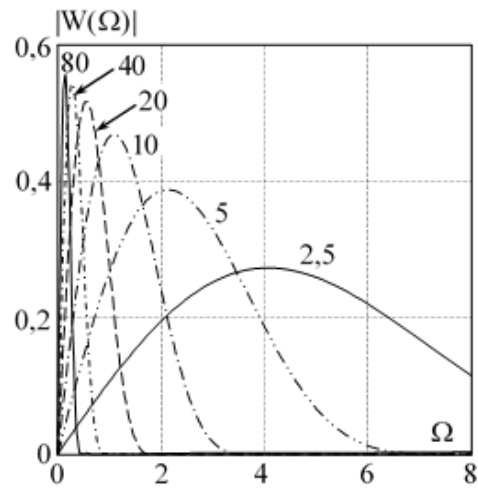


Рис. 3 Хвильові характеристики дискових перетворювачів ємнісного типу

на площині навантаження, а за межами цього площини пружні збурення не спостерігаються.

Зазначені особливості частотно залежної зміни функції $W(\Omega)$ пояснюються інтерференцією хвильових полів, які випромінюються в пружну середу різними ділянками деформованого твердого тіла, які знаходяться в області існування зовнішніх сил.

На рис. 3 показані результати обчислень інтеграла (4) для реального розподілу поверхневої густини сил Кулона. По осі ординат, рис. 3, відкладені числові значення модуля хвильової характеристики $W(\Omega)$. По осі абсцис - безрозмірне хвильове число $\Omega = \gamma_R R$, значення якого визначено в припущенні, що $R = 5 \cdot 10^{-3}$ м. Для середнього для сталей значення коефіцієнта Пуассона $\nu = \sqrt{0,23 \cdot 0,31} = 0,27$ і щільності

$\rho_0 = \sqrt{7500 \cdot 7920} = 7710 \text{ кг/м}^3$ отримуємо середнє значення швидкості хвилі Релея $v_R = 3042 \text{ м/с}$. При цьому значенню $\gamma_R R = 1$ відповідає циклічна частота $f = 96,9 \text{ кГц}$. Цифри, які проставлені в полі рисунка біля кривих відповідають значенням радіусів дисків в міліметрах. Чітко видно, що диски великих розмірів забезпечують ефективне збудження поверхневих хвиль Релея в області низьких частот. Для збудження ультразвукових імпульсів зі спектром в сотні кілогерц необхідно використовувати диски, радіуси яких менше п'яти міліметрів.

З аналізу даних наведених на рис. 2 і рис.3 можна зробити висновок про можливість використання тільки ділянок дискового електрода ЄП, які забезпечують збудження когерентних ультразвукових поверхневих хвиль. Для цього необхідно дисковий електрод виготовити з декількох концентричних кілець, розташованих один від одного на розрахунковій відстані, рис.4 (a - ширина електрода, b - ширина діелектричного проміжку), і розділених непровідними проміжками, які могли б збуджувати प्रतिфазні ультразвукові хвилі.

Розрахунки за виразом (4) показують, що запропонований варіант конструкції електрода ЄП може бути реалізований для заданої частоти ультразвукових коливань і відомої швидкості поширення ультразвукової хвилі для досліджуваного матеріалу.

Стандартно частота ультразвукових коливань задається нормативно-технічною документацією на ОД. Швидкість поширення ультразвукової хвилі для досліджуваного матеріалу не завжди постійна, вона може змінюватися в процесі експлуатації виробу, від прикладених напружень, температури, нестабільності технології виробництва. Сумарні зміни швидкості поширення ультразвукової хвилі не перевищують 1-2%, що може бути скориговано зміною частоти збудження ультразвукових коливань в межах допуску, встановленого нормативно-технічною документацією на ОД.

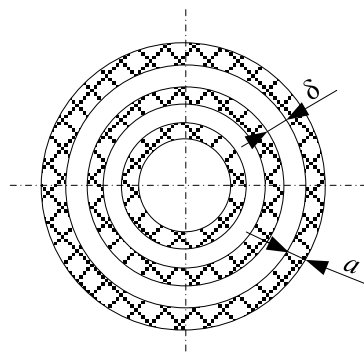


Рис. 4. Зображення дискового ємнісного перетворювача

Для експериментальної перевірки запропонованого технічного рішення розроблений стенд, блок-схема якого приведена на рис.5. На рис.5 показано: 1 - електрод ЄП; 2 - приймальний електромагнітно - акустичний перетворювач; 3 - високочастотний малощумлячий підсилювач; 4 - осцилограф; 5 - блок управління і обробки інформації; 6 - генератор пакетних радіоімпульсів; 7 - ОД. С - розділова ємність. R - резистор. Стрілками показано напрямок поширення збуджених поверхневих хвиль.

Пристрій працює наступним чином. На металеві кільця дискового електрода 1 одночасно подаються: через активний резистор R постійна поляризуюча напруга і змінна. Генератор високочастотних імпульсів 6 з'єднаний з ЄП через ємність С, що дозволяє врегулювати високочастотний імпульс.

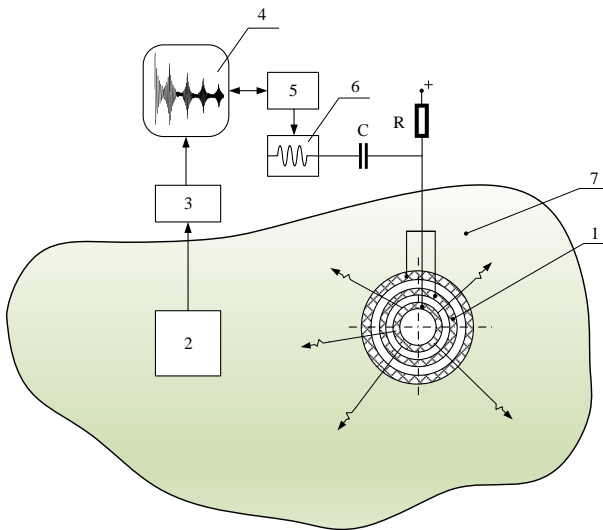


Рис. 5 Блок-схема експериментальної установки

В результаті накладання змінного і поляризованого напружень у виробі формуються імпульси ультразвукових коливань певної частоти, які поширюються в різні боки від перетворювача. Частина ультразвукових коливань приймають електромагнітно-акустичним перетворювачем 2, звідки електричні імпульси надходять на високочастотний малошумлячий підсилювач. Блок управління і обробки інформації задає керуючий сигнал для синхронізації роботи електричних апаратів випромінювання і прийому.

На рис.6 приведена часова розгортка на екрані осцилографа, отримана при наступних умовах: частота ультразвукових коливань - 0,9 МГц; тривалість імпульсу збудження змінного електричного поля - 6 періодів частоти заповнення; відстань між електродами і ОД - 0,2 мм; напруга поляризованого електричного поля - 1200 В; пікова напруга змінного електричного поля - 1000 В. Досліджуваний матеріал - сталь ст.45.

Abstract

A mathematical model of a capacitive ultrasonic transducer is designed allowing to emit ultrasonic vibrations into an electrically conductive product. The influence of a polarizing electrostatic field on the Coulomb forces formation in the surface layer of a metal sample is determined. A closed solution to the electrostatics problem is obtained for a piecewise homogeneous medium in which a half-space is filled with metal having finite values of electrical conductivity and magnetic permeability. An expression is obtained for calculating the surface density of a static electric charge on the metal sample surface. The main influencing factors that determine the spatial distribution of the charge density on the product surface, which will form the radiation pattern and power of the emitted ultrasound field, are defined. As part of the mathematical model of a capacitive sensor in the mode of converting electric energy to high-frequency mechanical (ultrasonic) energy in metals, closed solutions for electrostatics and electrodynamics problems are constructed in relation to a piecewise-homogeneous medium in which a half-space is filled with metal having finite values of electrical conductivity and magnetic permeability. It is determined that a capacitive disk transducer excites forces acting normally to the surface of electrically conductive products. A quantitative assessment of the surface density of the Coulomb forces is made. The main factors determining the sensitivity of a capacitive disk transducer are specified.

Key words: capacitive transducer, surface density of the Coulomb forces, ultrasonic waves excitation by surface loads, amplitude factor of a radially propagating Rayleigh wave, wave characteristic of the transducer in the radiation mode.

Аннотация

Разработана математическая модель емкостного ультразвукового преобразователя, предназначенного для излучения ультразвуковых колебаний в электропроводящее изделие. Рассмотрено влияние поляризованного электростатического поля по формированию сил Кулона в поверхностном слое металлического образца. Получено замкнутое решение задачи электростатики для кусочно-однородной среды, в которой полупространство заполнено металлом с конечными значениями электрической проводимости и магнитной проницаемости. Получено выражение для расчета поверхностной плотности статиче-

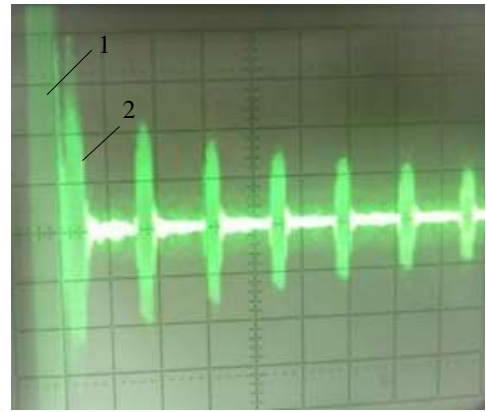


Рис. 6 Реалізація на екрані осцилографа ряду імпульсів, випромінюваних ЄП (0.2 В / поділку, 5 мкс / поділку):

1 - зонduючий імпульс; 2 - перший прийнятий імпульс від ЄП

Висновки.

1. Введено поняття хвильової характеристики перетворювача ємнісного типу з дисковим електродом.

2. Показана достатня ефективність збудження радіально поширюючихся хвиль Релея, що дозволяє виконувати діагностику виробів зі значною площею.

4. Установлено зв'язок між розміром дискового електрода і частотою збудження ультразвукових коливань. Для збільшення частоти збудження ультразвукових коливань, при інших рівних умовах, діаметр дискового електрода необхідно зменшувати.

5. Результати експериментальних досліджень підтвердили висновки теоретичних і модельних досліджень про можливість виконання вимірювань, контролю та діагностики поверхневими ультразвуковими хвилями, що збуджуються ЄП.

ского электрического заряда на поверхности металлического образца. Выявлены основные влияющие факторы, определяющие пространственное распределение плотности зарядов на поверхности изделия, которые будут формировать диаграмму направленности и мощность излучаемого ультразвукового поля. В рамках математической модели сенсора емкостного типа в режиме преобразования электрической энергии в высокочастотную механическую (ультразвуковую) в металлах построены замкнутые решения задач электростатики и электродинамики для кусочно-однородной среды, в которой полупространство заполнено металлом с конечными значениями электрической проводимости и магнитной проницаемости. Показано, что дисковым преобразователем емкостного типа возбуждаются силы, действующие нормально поверхности электропроводного изделия. Выполнена количественная оценка поверхностной плотности сил Кулона. Установлены основные факторы, определяющие чувствительность дискового преобразователя емкостного типа.

Ключевые слова: емкостной преобразователь, поверхностная плотность сил Кулона, возбуждение ультразвуковых волн поверхностными нагрузками, амплитудный множитель радиально распространяющейся волны Рэлея, волновая характеристика преобразователя в режиме излучения.

Список літератури

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. Семеренко А.В. Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок. / А.В. Семеренко // Территория NDT. 1, 2014. – с. 42–43.
3. Сучков Г.М. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 4. Экспериментальные исследования возможностей ультразвукового контроля ЭМА способом: Монография / Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, С.Н. Глоба // Харьков: Изд-во «Щедра садиба плюс», 2015. – 104 с.
4. Ноздрачова К.Л. Ємнісні способи збудження імпульсів ультразвукових хвиль в електропровідних виробах під кутом до поверхні / К.Л. Ноздрачова // Вісник НТУ «ХПІ» № 11 – 2019. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – С. 48–52.
5. О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1/ Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л., Романюк М.И. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев. – 2015 – № 1. – С. 45–50. <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01.05>
6. Improving principles of electric energy pulse transformation into high-frequency mechanical energy using capacitive method. / O.N. Petrishchev, K.L. Nozdrachova, G.M. Suchkov, R.P. Myhushchenko, O.Yu. Kropachek, S.Yu. Plesnetsov // Technical Electrodynamics – 2019(6), p. 18–24 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.018>

References

1. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushchiy kontrol' [Nondestructive testing]: handbook. Vol. 3: Ul'trazvu-

- kovoy kontrol' [Ultrasonic testing]. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 864 p. (in Russian)
2. Semerenko A.V. Primeneniye EMAP dlya kontrolya korrozii i erozii paronagrevateley kotel'nykh ustanovok [Application of EMAP for testing of corrosion and erosion of boiler steam boilers]. *Territory NDT*, 2014. No 1. pp. 42–43. (in Russian) <http://tdnt.idspektr.ru/index.php/online-01-2014>
3. Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Globa S.N. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast' 4. Eksperimental'nyye issledovaniya vozmozhnostey ul'trazvukovogo kontrolya EMA sposobom. [Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 4. Experimental studies of the possibilities of ultrasonic testing of the EMA method. Kharkiv: Shchedra sadiba plyus], 2015. 104 p. (in Russian)
4. Nozdrachova K.L. Yemnisni sposoby zbudzhennya impul'siv ul'trazvukovykh khvyly' v elektroprovodnykh vyrobakh pid kutom do poverkhni [Capacitive methods of excitation of pulses of ultrasonic waves in conductive products at an angle to the surface]. *Visnyk NTU "KPI"*. Kharkiv: NTU "KPI", 2019. No 11. Pp. 48–52. (in Ukrainian)
5. Suchkov G.M., Petrishev O.N., Nozdracheva E.L., Romanyuk M.I. O vzbuzhdenii ul'trazvukovykh voln v metallakh yemkostnym preobrazovatelem. Chast' 1. Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'. [Excitation of ultrasonic waves in metals by capacitive transducer. Part 1]. *Technical diagnostics and non-destructive testing*. 2015. № 1. Pp. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01.05> (in Russian)
6. Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L., Suchkov G.M., Myhushchenko R.P., Kropachek O.Yu., Plesnetsov S.Yu. Improving principles of electric energy pulse transformation into high-frequency mechanical energy using capacitive method. *Technical Electrodynamics*. 2019(6). Pp. 18–24.