

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЛУНА-ІМПУЛЬСНОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ ЗА ЇХ ЗНАЧНОГО ЗАГАСАННЯ

Е.Д. Близнюк¹, Ю.В. Куц², О.В. Монченко¹, Ю.А. Олійник²

¹Національний авіаційний університет. 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

E-mail: nau_409@ukr.net, monchenko_olena@ukr.net

²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: y.kuts@ukr.net

Розвинуто метод статистичної фазової ультразвукової товщинометрії виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвукових коливань на основі аналізу фазової характеристики сигналів. Наведено методику та результати моделювання процесу опрацювання сигналів в середовищі Matlab. Бібліогр. 10, рис. 3.

Ключові слова: ультразвуковий неруйнівний контроль, достовірність, статистична фазометрія

Однією з необхідних умов безаварійної експлуатації технічних систем є їх діагностика та контроль на різних етапах життєвого циклу. Ефективні технічні рішення таких завдань отримують на основі використання методів та засобів ультразвукового неруйнівного контролю (УЗНК) [1–3].

Значне коло завдань УЗНК пов'язане з визначенням геометричних розмірів об'єктів контролю (ОК). Стоншення елементів конструкцій і механізмів внаслідок зношування та дії різних видів корозії було і лишається однією з найнебезпечніших загроз, що приводить до втрати ними несучої спроможності, погіршення експлуатаційних характеристик та руйнування. Широко розповсюдженим методом ультразвукової товщинометрії (УЗТ) є луна-імпульсний метод, який ґрунтується на визначенні часу поширення ультразвукових коливань в ОК. На початкових етапах розвитку цей метод УЗТ застосовувався для контролю виробів з металів та сплавів, що визначило основні ідеї і напрями розроблення апаратури та удосконалення методів оцінювання параметрів та характеристик сигналів УЗТ.

Останнім часом в промисловості і на транспорті значного поширення набувають нові конструкційні матеріали. Зокрема до таких матеріалів належать композиційні матеріали, які порівняно з металами характеризуються більшим загасанням ультразвукових коливань та розкидом фізико-механічних характеристик. Контроль товщини виробів з таких матеріалів відомими методами і засобами ускладнений внаслідок суттєвого зменшення відношення сигнал/шум (с/ш).

Підвищення достовірності виявлення сигналів УЗТ на фоні значних шумів в ряді завдань вирішується, до прикладу, збільшенням потужності зондуючих сигналів або збільшенням кількості вимірювальної інформації за рахунок підвищен-

ня частоти дискретизації сигналу в аналого-цифрових перетворювачах. Практична реалізація таких методів має певні обмеження і не завжди є прийнятною.

В більшості луна-імпульсних товщиномірів методологія опрацювання сигналів ґрунтується на використанні їх амплітудних характеристик [4–7]. Амплітудні методи виявлення сигналів мають просту апаратну реалізацію, проте отримуваний результат залежить не тільки від форми, але й від величини сигналу.

Фазовий зсув є неенергетичним параметром сигналу і має фіксований максимальний розмір 2π не залежний від амплітуди сигналу. Не дивлячись на ці та інші переваги інформація, що міститься в фазових характеристиках сигналів (ФХС) не береться до уваги у засобах УЗТ. Це частково пояснюється значною обчислювальною складністю фазових методів і необхідністю використання високопродуктивних засобів оброблення сигналів. В останні роки значні успіхи в розвитку інформаційно-вимірювальних технологій, цифрової та мікропроцесорної техніки створили умови для широкого застосування таких методів в засобах УЗНК. Таким чином завдання удосконалення луна-імпульсного методу УЗТ на основі більш повного використання особливостей фазової структури інформаційних сигналів є актуальним і економічно виправданим.

В роботах [8, 9] запропоновано метод УЗТ, що ґрунтується на положеннях статистичної фазометрії. В статті розглянуто подальше удосконалення цього методу стосовно підвищення вірогідності виявлення сигналів УЗТ в умовах їх значного зашумлення.

Постановка задачі. Визначається товщина ОК з матеріалу зі значним загасанням ультразвуковим

луна-імпульсним методом. Введення/виведення ультразвукового сигналу в/з ОК відбувається за допомогою сумішеного п'єзоелектричного перетворювача. Зондування ОК здійснюється радіоімпульсним сигналом виду

$$u_3(t) = \begin{cases} U \sin(2\pi ft + \theta), & t \in [0, T_3], \\ 0, & t \notin [0, T_3] \end{cases} \quad (1)$$

з відомою амплітудою U , частотою f і тривалістю T_3 , що не перевищує декількох періодів сигналу-носія $T = f^{-1}$, та початковою фазою $\theta \in [0, 2\pi]$.

Досліджуваний сигнал $u(t)$ являє собою адитивну суміш донних сигналів УЗТ (періодичну з періодом повторення T_{Π} послідовності відбитих від протилежної сторони ОК донних сигналів) і реалізації гауссового шуму $\xi(t)$ виду

$$u(t) = \sum_{i=1}^k K_i u_3(t - \tau_3 - (i-1)T_{\Pi}) + \xi(t), \quad (2)$$

де K_i – коефіцієнти електроакустичного тракту для i -го донного сигналу, $i = 1, k$; τ_3 – затримка на поширення акустичного сигналу в ОК у прямому і зворотному напрямках; k – кількість спостережуваних донних сигналів; $\xi(t)$ – реалізація гауссового шуму з нульовим математичним сподіванням і дисперсією σ^2 . Аналіз сигналу (2) виконується на часовому інтервалі $t \in [0, T_a]$. Відношення с/ш оцінюється як с/ш $= K_i U / \sigma$ і може зменшуватись до одиниці і менше.

Необхідно удосконалити метод луна-імпульсної УЗТ, який ґрунтується на статистичному опрацюванні ФХС УЗТ, для підвищення достовірності виявлення донних сигналів у суміші (2).

Розв'язання поставленого завдання. Відомий метод УЗТ [9] ґрунтується на виявленні донних імпульсів за поточним значенням r -статистики, яка визначається з фазових характеристик сигналу (2). r -статистика [8, 10], або вибіркова результуюча довжина вектора, належить до числа кругових статистик, які визначаються для розподілених на колі випадкових кутів або фазових зсувів сигналів. Удосконалення цього способу виконується за рахунок використання додаткової вагової функції для зваженого оцінювання r -статистики. Ідея такого методу полягає у наступному.

Для досліджуваного сигналу (2) за допомогою його перетворення Гільберта (ПГ) визначається фазова характеристика [8] як функція часу, обчислюється різниця цієї характеристики та фази гар-

монічного колювання з частотою f сигналу-носія, розраховуються значення r -статистики, отримані під час ковзного віконного опрацювання цієї різниці фаз вікном $W1$, визначається зважена статистика $r_{зв}$, як результат перемноження r -статистики на поточні значення відгуку оператора вибіркового середнього квадратичного відхилення, отримані під час ковзного віконного опрацювання r -статистики іншим вікном $W2$. За статистикою $r_{зв}$ визначає положення в часі донних імпульсів.

Структурно-логічну схему опрацювання сигналів УЗТ та формування рішення про наявність донних сигналів представлено на рис. 1.

Для елементів схеми використано наступні позначення: ПГ – перетворювач Гільберта; ФХС – модуль визначення ФХС; Σ – суматор; ВО1, ВО2 – модулі віконного опрацювання сигналу; r , $r_{зв}$ – модулі визначення відповідно r -статистики та $r_{зв}$ -статистики; СКВ – модуль, що реалізує оператор вибіркового середнього квадратичного відхилення; ПП – модуль порівняння з порогом Π , прийняття рішення про наявність донного сигналу та визначення його положення в часі. Областю значень r -статистики є інтервал $[0, 1]$, тому рішення про наявність донного сигналу формується на основі порівняння поточних значень $r[j]$ з порогом $0 < \Pi < 1$.

Реалізація процесу цифрового опрацювання сигналів УЗТ. Після аналого-цифрового перетворення сигналу (2), яке виконується з періодом дискретизації $T_d \ll f^{-1}$, останній представляється цифровою послідовністю $u[j]$, $j = 1, N$, де $N = T_a / T_d$ (з точністю до цілого числа). До $u[j]$ застосовується дискретне ПГ [8], яке в модулі ПГ (рис. 1) реалізується оператором \mathbf{H}_d і отримується гільберт-образ вибірки

$$\hat{u}[j] = \mathbf{H}_d(u[j]), \quad j = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Дискретна фазова характеристика сигналу на всьому інтервалі його аналізу визначається в модулі «ФХС» за алгоритмом [3]:

$$\Phi[j] = \arctg \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + \mathbf{L}(\hat{u}[j], u[j]), \quad (4)$$

де \mathbf{L} – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі інтервалу $[-0,5\pi; 0,5\pi]$, тобто за межі однозначного визначення функції \arctg .

Значення r -статистики отримують в модулі « r » з послідовності $\phi[j] = \Phi[j] - 2\pi f T_d j$, $j = 1, N$, яку обчислюють в модулі « Σ ». В останньому виразі $2\pi f T_d j$ – це поточні значення дискретної ФХС гармонічного сигналу з частотою f . Поточні значення r -статистики визначаються у ковзному режимі, який забезпечується модулем «ВО1» шляхом відбору певної підмножини значень послідовності $\phi[j]$. Якщо вікно $W1$ має апертуру $(2M+1)$, то

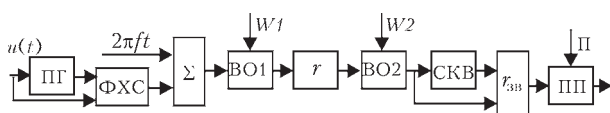


Рис. 1. Структурно-логічна схема опрацювання сигналів УЗТ за запропонованим методом (позначення див. у тексті)

кожне j -те значення цієї статистики обчислюється за формулою:

$$r[j] = \frac{1}{2M+1} \sqrt{\left(\sum_{k=j-M}^{j+M} \cos \varphi[k] \right)^2 + \left(\sum_{k=j-M}^{j+M} \sin \varphi[k] \right)^2},$$

$$j = \overline{M, N-M}. \quad (5)$$

Після отримання r -статистики в модулі «СКВ» визначаються вагові коефіцієнти $\sigma_r[j]$, як відгуки оператора вибіркового середнього квадратичного відхилення на підмножину значень $r[j]$. Ця процедура реалізується в модулі «ВО2» під час опрацювання послідовності $r[j]$ ковзним вікном з апертурою $(2M_\sigma + 1)$:

$$\sigma_r[j] = \sqrt{\frac{1}{2M_\sigma} \sum_{k=j-M_\sigma}^{j+M_\sigma} (r[k] - \bar{r}_j)^2},$$

$$j = \overline{M_\sigma, N-M_\sigma}, \quad (6)$$

де \bar{r}_j – середнє значення відібраних вікном $W2$ елементів підмножини $r[j]$.

Поточні значення зваженої статистики r_{3B} визначаються у відповідному модулі « r_{3B} » за формулою

$$r_{3B}[j] = r[j] \sigma_r[j]. \quad (7)$$

Рішення про наявність/відсутність донного сигналу приймається в модулі «ПП» за результатами порівняння значень $r_{3B}[j]$ з пороговим рівнем Π , який визначається на етапі тестування.

Процедура (7) вагового опрацювання r -статистики призводить до збільшення відношення с/ш і, як наслідок, до підвищення достовірності виявлення сигналів УЗТ, що підтверджується результатами модельних досліджень.

Моделювання. Дослідження виконувались на моделі сигналу (2) з наступними параметрами: $f = 5$ кГц; $U = 1$ В; $\sigma = 0,5$ В; $T_3 = 0,6$ мс; $T_a = 1,6$ с;

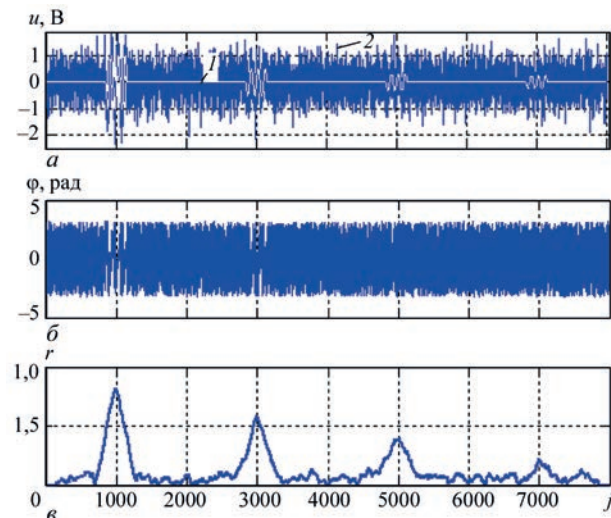


Рис. 2. Вибірки досліджуваного сигналу (а), послідовності $\varphi[j]$ (б) та r -статистики (в)

$T_\Pi = 0,4$ с; $\tau_3 = 0,2$ с; $k = 4$; $K = \{1, 1/2, 1/3, 1/4\}$. Отримана вибірка сигналу обсягу $N = 8000$ зображена на рис. 2, а.

З урахуванням заданих параметрів відношення с/ш для донних сигналів становить: $\{2, 1, 2/3, 0,5\}$.

За результатом реалізації поданого вище процесу цифрового опрацювання вибірки $u[j]$, $j = 1, 8000$, отримано послідовності $\varphi[j]$ та $r[j]$, які зображені відповідно на рис. 2, б, в. В обчисленнях використане вікно $W1$ має апертуру $M = 300$, що відповідає в часі тривалості донного сигналу.

Областю значень r -статистики є інтервал $[0, 1]$. Тому рішення про наявність донного сигналу формується на основі порівняння поточних значень $r[j]$ з певним порогом $\Pi < 1$. В структурі рис. 1 ця операція виконується в модулі ПП.

Характерною особливістю r -статистики є її інваріантність до початкової фази θ моделі (1). Крім того, з аналізу рис. 2, в можна відзначити інші її особливості, важливі для УЗТ: максимумами $r[j]$ в часі співпадають з положенням донних сигналів; амплітудні значення $r[j]$ зменшуються зі зменшенням відношення с/ш. Остання закономірність призводить до зменшення достовірності виявлення донних сигналів УЗТ.

Підвищення відношення с/ш і, відповідно, підвищення вірогідності виявлення донних сигналів досягається за рахунок додаткового вагового опрацювання послідовності $r[j]$, тобто без збільшення потужності зондуючого сигналу чи збільшення кількості вимірювальної інформації. На рис. 3 наведено графіки раніше отриманої послідовності $r[j]$ та нової послідовності $r_{3B}[j]$. Остання обчислена за модифікованою формулою (7)

$$r_{3B}[j] = r[j] \sigma_r[j] (j/400+4). \quad (8)$$

Введений у вираз (8) емпіричний коефіцієнт $(j/400+4)$ не має принципового значення для підвищення відношення с/ш, але дозволяє «вирівняти» амплітуди донних сигналів у двох послідовностях і забезпечити більш наочний і об'єктивний їх співставний аналіз.

Наведені на рис. 3 графіки свідчать про певне зменшення шумової складової послідовності $r_{3B}[j]$ відносно $r[j]$. Беручи до уваги той факт, що r -статистика є неенергетичним параметром, а рішення про наявність донних сигналів приймається за результатами аналізу її поточних значень, доцільно

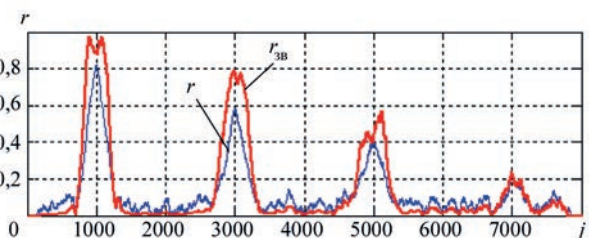


Рис. 3. Графічне зображення послідовностей $r[j]$ та $r_{3B}[j]$

оцінювати відношення с/ш в послідовностях $r_{3B}[j]$ та $r[j]$ відношенням їх максимальних значень на ділянках донного сигналу і шуму, тобто відношеннями $r(c)/r(ш)$ та $r_{3B}(c)/r_{3B}(ш)$. За такою методикою для четвертого донного сигналу маємо

$$r(c)/r(ш) \cong 0,22/0,114 \cong 2,$$

натомість для послідовності $r_{3B}[j]$ маємо

$$r_{3B}(c)/r_{3B}(ш) \cong 0,24/0,06 \cong 4,$$

тобто покращення відношення с/ш приблизно у два рази. Цей висновок був в цілому підтверджений у серії зі 100 модельних експериментів.

Таким чином, додаткове вагове опрацювання r -статистики дозволяє підвищити відношення с/ш для сигналів УЗТ, що сприяє підвищенню достовірності їх виявлення в завданнях контролю товщини виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвукових коливань.

Крім того, підвищення відношення с/ш дозволяє покращити точність вимірювання товщини виробів ультразвуковим луна-імпульсним методом за рахунок виявлення більшої кількості донних сигналів і можливості статистичного усереднення більших обсягів експериментальних даних.

Подальше удосконалення розглянутого методу УЗТ потребує більш детального аналізу впливу розміру та форми апертур вікон на відношення с/ш для r -статистики.

Висновки

Удосконалено та досліджено метод статистичного опрацювання результатів вимірювання товщини виробів для ультразвукових луна-імпульсних товщиномірів. Метод ґрунтується на аналізі поточних значень зваженої r -статистики, яка визначається за фазовими характеристиками сигналів УЗТ.

Дослідження проводились на моделі сигналу, що являє собою адитивну суміш послідовності загасаючих донних сигналів УЗТ і реалізації гауссового шуму. Результатами моделювання доведено, що додаткове вагове опрацювання r -статистики дозволяє підвищити відношення с/ш приблизно у два рази без збільшення потужності зондуючих сигналів чи збільшення кількості вимірювальної інформації.

Експериментальними дослідженнями доведено, що застосування додаткового вагового опрацювання r -статистики дозволяє підвищити вірогідність виявлення сигналів УЗТ на приблизно 10 % і дає змогу виявляти сигнали УЗТ за відношення с/ш одиниця і менше.

Подальше удосконалення дослідження розглянутого способу УЗТ на основі використання методу статистичної фазометрії потребує

більш детального аналізу впливу розміру та форми апертур вікон на відношення с/ш для r -статистики.

Отримані результати можуть бути використані для розроблення нових ультразвукових луна-імпульсних товщиномірів, призначених для роботи з матеріалами зі значним загасанням ультразвукових коливань. Розроблене програмне забезпечення може бути використано як автономно, так і у складі програмно-апаратних засобів УЗТ.

Список літератури

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. (1991) *Ультразвуковой контроль материалов*: справоч. изд., пер.с нем. Москва, Металлургия.
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. (2004) *Неразрушающий контроль*: Справочник: В 7 т. Ключев В.В. (ред.). Т.3: Ультразвуковой контроль. Москва, Машиностроение.
3. Цапенко В.К., Куц Ю.В. (2010) *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*: Підручник. Київ, НТУУ «КПІ».
4. Чуприн В.А., Бизюлев А.Н., Коновалов А.А. (2008) Особенности ультразвуковой толщинометрии промышленных объектов и изделий. *В мире неразрушающего контроля*, 2(40), 12–14.
5. Королев М.В. (1980) *Эхо-импульсные толщинометры*. Москва, Машиностроение.
6. Кретов Е.Ф. (2008) Ультразвуковая толщинометрия в машиностроении. *В мире неразрушающего контроля*, 2, 26–28.
7. Семеренко А.В. (2008) Эхо-метод ультразвуковой толщинометрии. *Там же*, 2(40), 6–10.
8. Куц Ю.В., Щербак Л.М. (2009) *Статистична фазометрія*. Тернопіль, ТДТУім. Івана Пулюя.
9. Куц Ю.В., Єременко В.С., Монченко О.В., Лапіга І.М. (2006) *Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів*. Україна Пат. на корисну модель № 35057, МПК G01B 17/02.
10. Fisher N.I. (2000) *Statistical Analysis of Circular Data*. Cambridge University Press.

References

1. Krautkramer, J., Krautkramer, G. (1991) *Ultrasonic control of materials*: Refer. book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Ermolov, I.N., Lange, Yu.V. (2004) *Nondestructive testing*: Refer. book. In: 7 Vol. Ed. by V.V. Klyuev. Vol. 3: Ultrasonic control. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Tsapenko, V.K., Kuts, Yu.V. (2010) *Principles of ultrasonic nondestructive testing*: Manual. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
4. Chuprin, V.A., Bizyulev, A.N., Konovalov, A.A. (2008) Specifics of ultrasonic thickness measurement of industrial facilities and products. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, 2(40), 12–14 [in Russian].
5. Korolyov, M.V. (1980) *Pulse-echo thickness gauges*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Kretov, E.F. (2008) Ultrasonic thickness measurement in machine-building. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, 2, 26–28 [in Russian].
7. Semerenko, A.V. (2008) Echo-method of ultrasonic thickness measurement. *Ibid.*, 2(40), 6–10 [in Russian].
8. Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2009) *Statistic phasometry*. Ternopil, TDTU [in Ukrainian].
9. Kuts, Yu.V., Eremenko, V.S., Monchenko, O.V., Lapiga, I.M. (2006) *Method of ultrasonic measurement of thickness of products*. Ukraine Pat. on utility model 35057, Int. Cl. G01B 17/02 [in Ukrainian].
10. Fisher, N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge University Press.

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХО-ИМПУЛЬСНОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ПРИ ИХ ЗНАЧИТЕЛЬНОМ ЗАТУХАНИИ

Е.Д. Близнюк¹, Ю.В. Куц², Е.В. Монченко¹, Ю.А. Олейник²

¹Национальный авиационный университет. 03058, г. Киев, просп. Космонавта Комарова, 1.

E-mail: au_409@ukr.net, monchenko_olena@ukr.net

²НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37.

E-mail: y.kuts@ukr.net

Развитие метода статистической фазовой ультразвуковой толщинометрии изделий из материалов со значительным затуханием ультразвуковых колебаний на основе анализа фазовой характеристики сигналов. Приведена методика и результаты моделирования процесса обработки сигналов в среде Matlab. Библиогр. 10, рис. 3.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, достоверность, статистическая фазометрия

IMPROVEMENT OF VALIDITY OF DETECTION OF SIGNALS OF ULTRASONIC PULSE-ECHO THICKNESS MEASUREMENT AT THEIR CONSIDERABLE ATTENUATION

E.D. Bliznyuk¹, Yu.V. Kuts², O.V. Monchenko¹, Yu.A. Oliynik²

¹Ntional Aviation University. 1 Kosmonavta Komarova Prosp., 03058, Kyiv, Ukraine.

E-mail: nau_409@ukr.net, monchenko_olena@ukr.net

²NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: y.kuts@ukr.net

The method of statistical phase ultrasonic thickness measurement of products from materials with considerable attenuation of ultrasonic oscillations, based on analysis of phase characteristic of signals, was developed. The procedure and results of modeling the signal processing in Matlab environment are given. 10 Ref., 3 Fig.

Keywords: ultrasonic nondestructive testing, validity, statistical phasometry

Надійшла до редакції
13.03.2019



Навчальний центр підприємства «ДП-ТЕСТ»

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики

Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**III НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
з міжнародною участю**

**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА
УКРАЇНИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ**

17-20 вересня 2019 р.

Основні теми:

- законодавство в сфері неруйнівного контролю;
- технічні регламенти;
- метрологія і стандартизація;
- навчання та сертифікація персоналу;
- функціонування лабораторії неруйнівного контролю;
- сучасні засоби, приладдя, системи неруйнівного контролю.

В рамках події відбудеться низка практичних семінарів з демонстрацією новітнього обладнання та засобів контролю, круглі столи з дискусійних питань роботи служб неруйнівного контролю на підприємствах України.

Адреса оргкомітету:

03061, м.Київ, вул. Патріотів 103

Тел./факс:(044) 239-12-50, e-mail: support@ndt-ua.com, http://www.dp-test.com

Місце проведення:

Готель «VitaPark Аквадар». Україна, Черкаська обл., смт. Маньківка, вул. Лісова, 1.