



## ТЕОРИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРИЕМА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Б. М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, Л. В. ГЛЕБОВА, инж., И. В. ТЮПА, канд. техн. наук  
(НТУ «Харьковский политехнический институт»)

*Теоретически и практически установлена возможность возбуждения и приема ультразвуковых колебаний емкостным способом с достаточно высоким уровнем электрического сигнала в широком частотном диапазоне. Показано, что существует достаточное количество способов получения оптимального по уровню выходного сигнала емкостного преобразователя.*

*Possibility of excitation and reception of ultrasonic oscillations by the capacitive method with a sufficiently high level of electric signal in a broad frequency range was established in terms of theory and practice. It is shown that there exist a sufficient number of methods to obtain the capacitive transducer output signal of an optimum level.*

Ультразвуковые (УЗ) методы неразрушающего контроля (НК) в настоящее время занимают главенствующее положение среди остальных методов в связи с возможностью их применения для решения различных задач, хорошо развитой теоретической и экспериментальной базой и широкой реализацией в виде серийно выпускаемых приборов и устройств. Классический способ возбуждения и приема акустических волн с использованием пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) наряду с преимуществами (высокий коэффициент передачи) имеет и ряд недостатков (ограничение по типам волн и рабочий частотный диапазон). Альтернативой этому методу является применение электромагнитно-акустических и емкостных преобразователей (ЕП). В последнее время ведутся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования в области использования электромагнитно-акустических преобразователей. В случае ЕП фундаментальных теоретических и практических работ по изучению данного способа возбуждения и приема волн в литературе не описано [1]. Основной причиной бесперспективности данного способа считается низкая чувствительность (на  $10^3 \dots 10^5$  меньше) по сравнению с классическими УЗ методами. Тем не менее, в работе [2] экспериментально доказано, что использование ЕП в качестве источника УЗ колебаний позволяет получить акустический сигнал в режиме возбуждения, достаточный для уверенной регистрации его в режиме приема с использованием стандартной аппаратуры.

Целью данной работы является теоретическое описание и экспериментальное подтверждение процесса возбуждения УЗ колебаний в упругой среде емкостным способом, что позволит оценить уровни выходного сигнала ЕП в режиме приема акустических волн для дальнейшего выбора оп-

тимальных параметров датчика и режимов работы возбуждающей и приемной аппаратуры.

**Режим возбуждения.** Выберем в качестве объекта контроля (ОК) цилиндрический стальной образец плотностью  $\rho$  и скоростью распространения в нем акустической волны  $c$  (рис. 1). К верхней плоскости цилиндра через диэлектрическую прослойку  $d_1$  с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  прикреплен возбуждающий емкостной преобразователь (ВЕП) радиуса  $R_1$ . На ОК и электрод подается постоянное напряжение  $V_n$  и переменное напряжение  $V_0$  частотой  $f$  с помощью генератора  $G$  и источника постоянного напряжения (ИПН). В пространстве ОК вдоль оси  $z$  распространяется акустическая волна амплитудой  $U_z$ . В точке наблюдения (обратная сторона цилиндра) с координатами  $M(0,0,z_0)$  расположен приемный емкостной преобразователь (ПрЕП) в виде пластины радиуса  $R_2$ , с диэлектрической прослойкой толщиной  $d_2$  и  $\epsilon_2$ . Выходной сигнал  $V_{\text{вых}}$  снимается с ПрЕП путем подачи поляризующего напряжения  $V_n$  с использованием схемы электретного микрофона.

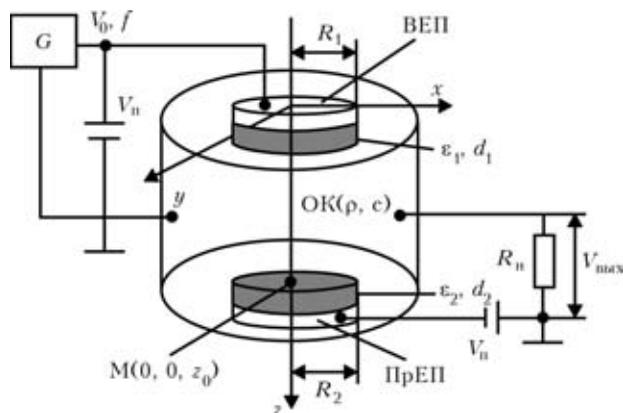


Рис. 1. Схема возбуждения и приема УЗ колебаний емкостным способом (обозначения см. в тексте)



Энергия электрического поля конденсатора определяется формулой [3]:

$$W_c = \frac{c U^2}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d}, \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение, подаваемое на обкладки конденсатора;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  $S$  — площадь обкладки;  $d$  — расстояние между обкладками.

Приняв во внимание, что напряжение на обкладках конденсатора изменяется по закону  $U_{\pm} = U_0 \sin \omega t$  и электродинамическое давление строго перпендикулярно площади электрода, запишем выражение для давления  $P_0$  на поверхность ОК как дифференциал от энергии конденсатора:

$$P_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0 U_0^2 \sin^2 \omega t}{2d^2}. \quad (2)$$

Поскольку  $\sin^2 \omega t = 1/2 (1 - \cos 2\omega t)$ , то выражение (2) примет вид:

$$P_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0}{4d^2} (U_0^2 - U_0^2 \cos 2\omega t). \quad (3)$$

Как видно из этого выражения при подаче на конденсатор переменного напряжения частотой  $\omega$  амплитуда давления  $P_0$  изменяется во времени с удвоенной частотой  $2\omega$ . Для устранения данной особенности применяется поляризация конденсатора путем подачи на его обкладки постоянного напряжения  $U_{\text{п}}$ .

В таком случае выражение для давления  $P_0$  примет вид:

$$P_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0}{4d^2} (U_0 \sin \omega t + U_{\text{п}})^2 = \frac{\epsilon \epsilon_0}{4d^2} (2U_0 U_{\text{п}} \sin \omega t - U_0^2 \sin^2 \omega t) + \frac{\epsilon \epsilon_0}{4d^2} (U_0^2 + U_{\text{п}}^2). \quad (4)$$

Характерной особенностью полученных выражений является то, что амплитуда возбуждающего давления  $P_0$  по сути не зависит ни от формы, ни от площади электрода. Увеличение амплитуды давления, а следовательно, и амплитуды акустических колебаний, можно осуществить путем увеличения амплитуды переменного и поляризующего напряжений, подбора соответствующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью в качестве прослойки между электродом и поверхностью ОК, или уменьшения расстояния  $d$  между обкладками конденсатора.

Рассмотрим смещение материальных точек ОК вдоль оси  $z$ , вызванное переменным давлением  $P_0$ . Расположим точку наблюдения с координатами  $M(0,0,z_0)$  на обратной поверхности ОК (см. рис.

1). В общем случае вектор смещения  $\vec{U}_z$  будет определяться соотношением:

$$\vec{U}(M) = -\frac{1}{4\pi K_0} \times \int \int \int_{z \geq 0} \frac{P(x,y,z,t) |x-x_0, y-y_0, z-z_0|}{(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2})^{3/2}} dx dy dz, \quad (5)$$

где  $K_0$  — коэффициент, который является характеристикой материала образца и выражается через известные параметры, определяющие механические свойства материала ( $K_0 = \rho^2 c$ );  $P(x,y,z,t)$  — распределение давления на поверхности ОК (ограниченной площадью возбуждающего электрода).

Для точки наблюдения с координатами  $M\{0,0,z_0\}$ , выражение для смещения запишем в виде:

$$U_z(0, 0, z_0, t) = -\frac{1}{4\pi K_0} \times \int \int \int_{z \geq 0} \frac{P(x,y,z,t)(z-z_0)}{(\sqrt{x^2 + y^2 + (z-z_0)^2})^{3/2}} dx dy dz. \quad (6)$$

Эта формула в сферических координатах  $\rho, \epsilon, \theta$  имеет вид:

$$U_z(z_0, t) = -\frac{1}{4\pi K_0} \int_0^{\infty} d\rho \int_0^{\pi/2} d\theta \times \int_0^{2\pi} \frac{(\rho \cos \theta - z_0) P(\rho, \theta, t) \rho^2 \sin \theta}{(\rho^2 + z_0^2 - 2\rho z_0 \cos \theta)^{3/2}} d\varphi. \quad (7)$$

Смещение  $U_z$  не зависит от координаты  $\varphi$ , поэтому

$$U_z(z_0, t) = -\frac{1}{2K_0} \int_0^{\infty} d\rho \times \int_0^{\pi/2} \frac{(\rho \cos \theta - z_0) P(\rho, \theta, t) \rho^2 \sin \theta}{(\rho^2 + z_0^2 - 2\rho z_0 \cos \theta)^{3/2}} d\theta. \quad (8)$$

Подставив в полученное выражение значение давления [1] на поверхность полупространства  $P(\rho, \theta, t)$ , получим:

$$U_z(z_0, t) = -\frac{P_0}{4\pi K_0} \int_0^{\infty} \left[ \cos\left(\frac{\omega}{a}\rho\right) - \left(\frac{\omega}{a}\rho\right) \sin\left(\frac{\omega}{a}\rho\right) \right] \times \int_0^{\pi/2} \frac{(\rho \cos \theta - z_0) \rho^2 \cos \theta \sin \theta}{\rho^2 (\rho^2 + z_0^2 - 2\rho z_0 \cos \theta)^{3/2}} d\rho d\theta. \quad (9)$$

Для облегчения дальнейших преобразований выполним замену переменных  $\rho = z_0 \zeta$  и представим формулу (9) в виде:

$$U_z(z_0, t) = -\frac{P_0}{8\pi K_0 z_0} \times \int_0^\infty \left[ \cos\left(\frac{\omega}{a} z_0 \xi\right) - \left(\frac{\omega}{a} z_0 \xi\right) \sin\left(\frac{\omega}{a} z_0 \xi\right) \right] f(\xi) d\xi, \quad (10)$$

где  $f(\xi)$  — значение интеграла по координате  $\theta$ ,

$$f(\xi) = \int_0^\pi \frac{(\xi \cos\theta - 1) \cos\theta \sin\theta}{(1 + \xi^2 - 2\xi \cos\theta)^{3/2}} d\theta. \quad (11)$$

Интеграл (11) несобственный, поэтому, воспользовавшись средой MatLab с использованием Curve Fitting Toolbox, аппроксимируем интеграл (11) на промежутке  $0 \dots \pi$ :

$$f(\xi) = \begin{cases} -0,5 - 0,66\xi - 0,33\xi^2, & 0 < \xi < 1, \\ \frac{0,5}{\xi^2}, & \xi > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Подставив это выражение в формулу (10), получим:

$$U_z(z_0, t) = -\frac{P_0}{8\pi K_0 z_0} \left[ \frac{7}{3} \cos(kz_0) - \frac{13 \sin(kz_0)}{3(kz_0)} + 2 \frac{1 - \cos(kz_0)}{kz_0} - \frac{8}{3} \frac{1}{(kz_0)^2} \left( \cos(kz_0) - \frac{\sin(kz_0)}{(kz_0)} \right) \right] S, \quad (13)$$

где  $k = \omega/a$ .

Из формулы (13) видно, что помимо амплитуды возбуждающего давления  $P_0$  смещение акустической волны зависит от площади электрода конденсатора и частоты электрического поля. Исследуем влияние этих факторов, задавшись конкретными параметрами среды и условиями расчетного эксперимента: исследуемый ОК — сталь,  $\rho = 7,8 \text{ кг/м}^3$ ,  $c = 5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ; напряжение на обкладках конденсатора  $U_0 = 500 \text{ В}$ ,  $U_n = 500 \text{ В}$ ; радиус электрода  $R_1 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; расстояние между обкладками конденсатора  $d_1 = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . В качестве диэлектрической прослойки используется промасленная трансформаторная бумага ( $\epsilon = 40$ ).

На рис. 2 представлены величины смещения  $U_z$  в зависимости от различных диаметров пластины 10, 20 и 40 мм. Частота возбуждающего давления 10 МГц.

По оси  $x$  отложено расстояние от поверхности ОК (точка возбуждения УЗ колебаний) до точки наблюдения УЗ колебаний вдоль оси  $z$ . Из графиков видно, что увеличение площади электрода существенно увеличивает амплитуду УЗ волны и влияет на процесс затухания волны в материале в сторону уменьшения коэффициента затухания с увеличением площади электрода.

Исследуем влияние частоты возбуждающего поля на процесс распространения УЗ колебаний

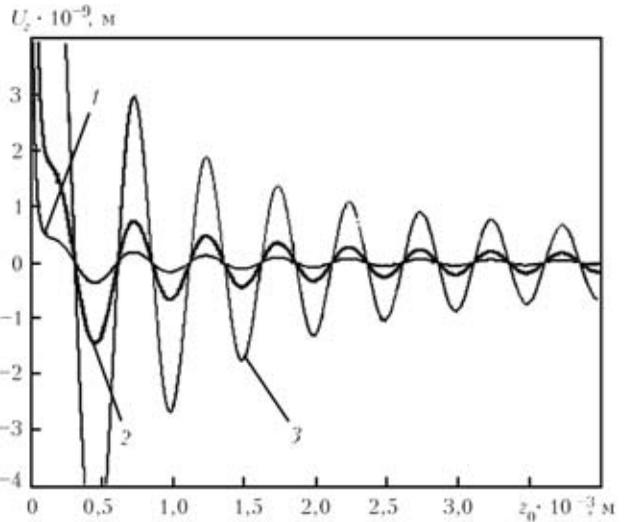


Рис. 2. Зависимости величины смещения  $U_z$  от различных диаметров пластины: 1 —  $d = 10$ ; 2 — 20; 3 — 40 мм

для фиксированного значения радиуса электрода  $R_1 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

На рис. 3 представлены зависимости величины смещения  $U_z$  для различных значений частоты 2; 5; 10; 20 МГц. Из графиков видно, что частота возбуждающего поля практически не влияет на процесс затухания акустической волны в ОК. При этом в области малых толщин изделия до 1 мм (расстояние до точки наблюдения  $z_0$ ) наблюдается существенное увеличение амплитуды звуковой волны. Таким образом, для контроля ОК малых толщин целесообразно использовать ЕП в области высоких частот.

**Режим приема.** Выше получены соотношения, которые позволяют определять смещение точек поверхности ОК под воздействием электромагнитного поля, которое создается плоским конденсатором. Также построены зависимости, которые описывают смещение материальных точек упругой среды от приложенного давления (электри-

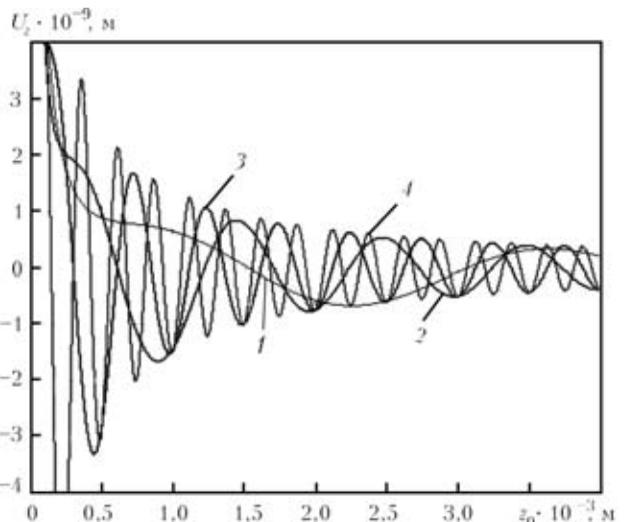


Рис. 3. Зависимости смещения  $U_z$  для различных значений частоты: 1 —  $f = 2$ ; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 20 МГц



ческого напряжения) и формы электрода (конденсаторной пластины). В некоторых работах [4] установлено, что ЕП может работать не только в режиме возбуждения УЗ колебаний, но и в режиме приема.

Очевидно, что при регистрации акустических сигналов емкость  $C_0$  преобразователя будет меняться из-за модуляции воздушного зазора между обкладками конденсатора под действием УЗ волны.

Запишем выражение для переменной емкости ЕП в режиме приема акустических колебаний в виде:

$$\Delta C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d_0 \pm \Delta d} \quad (14)$$

где  $d_0$  — начальное расстояние между конденсаторными пластинами;  $\Delta d$  — приращение расстояния между конденсаторными пластинами как вследствие колебаний поверхности ОК, так и по причине колебаний электрода.

Коэффициент затухания УЗ колебаний в ЕП существенно больше, чем в ОК и отсутствует передача механического воздействия на поверхность ОК через диэлектрическую прослойку. Тогда приращение расстояния между конденсаторными пластинами будет определяться только смещением точек поверхности  $U_z$ .

Исследуем возможность приема акустической волны емкостным способом согласно схеме (рис.1). Амплитуда выходного электрического сигнала на приемном ЕП будет определяться по формуле [5]:

$$U = \frac{U_z U_{\Pi}}{d} \quad (15)$$

Как видно из формулы, выходное напряжение не зависит от площади электрода и диэлектрических свойств изолирующей прослойки. Расстояние между обкладками конденсатора  $d_0$  определяется из выбранного поляризующего напряжения  $U_{\Pi}$  из условия пробивного напряжения диэлектрика, т. е. величину  $d_0$  можно существенно уменьшить за счет выбора эффективной диэлектрической прослойки. Например, в качестве обкладки приемного конденсатора можно использовать алюминиевую пластину, покрытую оксидной пленкой  $Al_2O_3$ , которая характеризуется хорошими диэлектрическими свойствами и высокой механической износостойкостью.

Зафиксируем значение поляризующего напряжения на уровне  $U_{\Pi} = 500$  В и расстояние  $d_0 = 0,1$  мм. Рассчитаем согласно формуле (15) выходное напряжение ЕП, зависящее от расстояния  $z_0$  от возбуждающего электрода для случая разных частот возбуждающего сигнала и радиусов электродов возбуждающего ЕП, т. е. проведем расчеты для случаев, представленных на рис. 4 и 5.

Из графических зависимостей видно, что уровень выходного сигнала ЕП достаточен для уве-

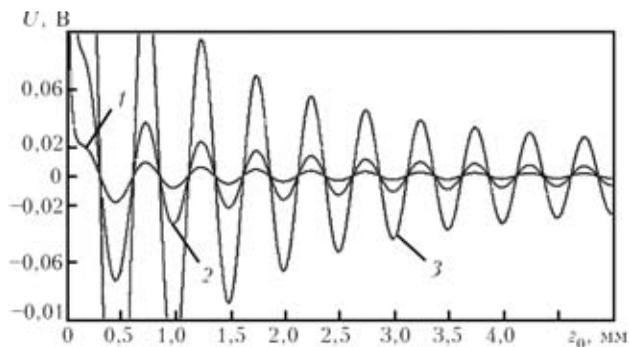


Рис. 4. Зависимости выходного сигнала  $U_z$  для различных диаметров пластины: 1 —  $d = 10$ ; 2 — 20; 3 — 40 мм

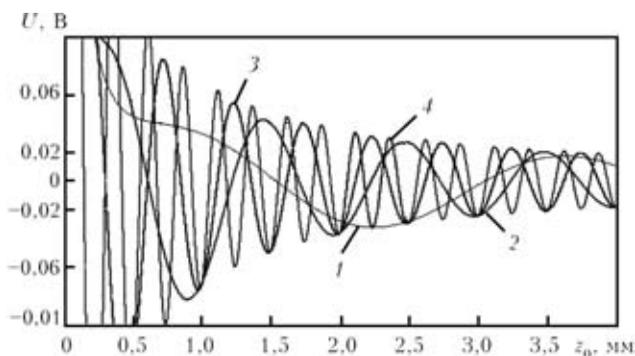


Рис. 5. Зависимости выходного сигнала  $U_z$  для различных значений частоты: 1 —  $f = 2$ ; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 20 МГц

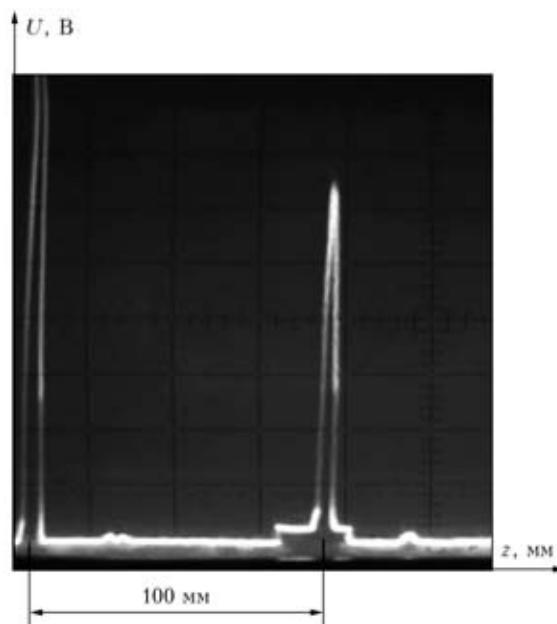


Рис. 6. Осциллограмма возбужденного и принятого УЗ сигнала на частоте 10 МГц

ренного приема, усиления и дальнейшей обработки и находится для данных примеров в диапазоне 200 мкВ...1 мВ на расстоянии  $z_0 = 100$  мм. Следует отметить, что для заданной толщины исследуемого изделия существует достаточное количество способов получения оптимального по уровню выходного сигнала путем варьирования физических параметров ЕП и условий эксплуатации. Оптимальный выходной сигнал ЕП для



конкретного значения  $z_0$  можно выразить целевой функцией вида:

$$U = \min f(U_{\text{п}}, U_0, f, V_{\text{п}}, R, d_0, d, z_0, \varepsilon). \quad (16)$$

Для примера проведем оптимизацию, задавшись значениями ЕП и ОК, для случая трех варьируемых параметров, а именно  $f, R, V_{\text{п}}$  для цилиндрического стального ОК длиной  $l = 100$  мм.

Согласно рис. 1, для полученных оптимальных значений параметров системы ЕП — ОК проведем эксперименты. Полученные результаты приведены на рис. 6, из которого видно хорошее согласование с теоретическими расчетами.

## Выводы

В результате проведенного в работе теоретического анализа процессов распространения УЗ волны в ОК, которая возбуждается ЕП, теоретически установлена и практически проверена на практике возможность приема УЗ колебаний емкостным способом с достаточно высоким уровнем электрического сигнала в широком частотном диапазоне.

Для повышения уровня выходного сигнала ЕП существует достаточно степеней свободы в выборе переменных параметров процесса возбуждения и приема с точки зрения повышения эффективности применения данного способа для задач НК.

1. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справ.: В 7 т / Под ред. В. В. Клюева. — Т.3. — Ультразвуковой контроль. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
2. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом / Ю. Б. Дробот, А. И. Кондратьев, В. А. Луговой // Дефектоскопия. — 1983. — № 3. — С. 35–37.
3. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — Изд. третье. — М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1946. — 660 с.
4. Гиттис М. Б., Добромислов В. М., Сажин В. В. Определение некоторых параметров датчиков ультразвуковых колебаний // Дефектоскопия. — 1971. — № 1. — С. 51–57.
5. Григорьев А. Л., Тюпа И. В., Глебова Л. В. Математическая модель емкостного метода возбуждения колебаний в упругих средах // Вісник НТУ «ХПІ»: Темат. вип. «Математичне моделювання в техніці та технологіях». — 2010. — № 68. — С. 38–51.

Поступила в редакцию  
04.04.2011

## ДЕСЯТА МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ"

Вже 10 років поспіль в НТУУ "КПІ" на базі приладобудівного факультету проходять міжнародні науково-технічні конференції "Приладобудування: стан і перспективи", учасниками якої є провідні спеціалісти України та зарубіжжя. В засіданнях цієї конференції приймали участь такі спеціалісти в галузі НК, як завідувачий відділом "Неруйнівного контролю" ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України д-р. техн. наук Троїцький В.О.; директор центру "Леотест-Медіум", співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України канд. техн. наук Учанин В. М.; завідувачий кафедрою приладів та методів НК НТУ "ХПІ" д-р. техн. наук Сучков Г. М., завідувачий відділом "Технічна діагностика зварних конструкцій" ІЕЗ д-р. техн. наук Недосека А. Я. та ін.

Цього року конференція відбувалась 19–20 квітня. В її роботі брали участь 410 представників промислових підприємств, академічних, вузівських та галузевих дослідницьких установ з 32 міст України, Білорусі тощо.

В рамках конференції на базі кафедри приладів та систем НК НТУУ "КПІ" проходили засідання секції "Неруйнівний контроль, технічна та медична діагностика". В її роботі, крім науковців цього інституту, прийняли участь спеціалісти з Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ), НТУ "ХПІ", Луганського державного медичного університету, Галицької академії, Донбаського державного технічного університету тощо.

Тематика доповідей торкалась як проблем контролю і діагностики в галузі медицини (наприклад, доповіді "Діагностування функціональних порушень за статистичними оцінками шумів дихальної системи", Івасів Т. В., Галицька академія; "Віртуальний кардіограф", Кришко Л.Є., НТУУ "КПІ"), так і в галузі технічних наук. В цьому напрямі хотілося б відмітити доповіді "Ємнісний метод комплексної оцінки якості дефектоскопічних рідин", Витвицька Л. А., Чуйко М. Н., ІФНТУНГ; "Підвищення достовірності контролю виробів з неоднорідною структурою", Галаган Р. М., НТУУ "КПІ" та доповідь "Исследование методом акустической интроскопии неравномерностей в формировании свойств порошковых материалов", Богдан Г. А., НТУУ "КПІ" та інш.

Розуміючи необхідність подальшого розвитку галузі неруйнівного контролю в майбутньому і важливість підготовки кваліфікованих кадрів для роботи в цій галузі кафедра приладів та систем НК НТУУ "КПІ" вже декілька років проводить студентські наукові конференції з питань НК, на які запрошуються кращі студенти фахових кафедр українських вузів.

Доповіді Десятої міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування: стан і перспективи" видано окремою збіркою. З нею можна ознайомитись в Оргкомітеті конференції, що розташований в НТУУ "КПІ", Приладобудівний факультет, кафедра приладів та систем НК, тел. 044-454-95-47, e-mail: psnk@kpi.ua.

Інформаційне повідомлення Ж.О. Павленко