

УДК 534:321.9:534.6

Т.М. Ільницька, В.П. Чалий, А.І. Кузій

ДП «НДІ метрології вимірювальних та управляючих систем», Львів, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕПЕВНОСТІ У ВИЗНАЧЕННІ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕТАЛОННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

*Проведено порівняння трьох різних можливих варіантів забезпечення точності у визначенні та підтриманні основних характеристик еталонного ультразвукового випромінювача. Подано фізичну і математичну моделі ультразвукового випромінювача резонансного типу з одним п'єзокерамічним чутливим елементом. Досліджені характеристики непевності, складений бюджет і проведено аналіз варіантів; запропоновано оптимальний.*

**Ключові слова:** еталон, непевність (невизначеність), ультразвук, потужність ультразвуку, ультразвуковий випромінювач.

### Вступ

Ультразвук в Україні, як і в інших розвинених країнах, використовується, практично, у всіх галузях народного господарства, у тому числі в хімічній, харчовій, фармацевтичній, металургійній промисловості; в будівельній індустрії; в навігації; в геофізичних дослідженнях та в багатьох інших галузях народного господарства та соціальної сфери. У всіх цих випадках вимагається достатня точність та достовірність результатів вимірювання, які простежуються до еталонів одиниць системи SI та визнаються на міжнародному рівні [1]. Але метрологічне забезпечення вимірювання в галузі мегагерцового ультразвуку у водному середовищі в країні на сьогодні розроблено недостатньо [2]. Найявні лише окремі елементи, але системи метрологічного забезпечення як такої не існує: відсутні первинні та вторинні еталони, немає повірочної схеми передавання одиниці вимірювання.

В Україні існує численний парк ультразвукового діагностичного, терапевтичного та хірургічного медичного обладнання. Відсутність еталонів як основи системи метрологічного забезпечення призводить, наприклад, до того, що при заниженій потужності ультразвукового випромінювання різко падає достовірність встановлення діагнозу на діагностичній та не досягається лікувальний ефект на ультразвуковій терапевтичній і хірургічній апаратурі.

Тому до «Державної програми розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки» була включена дослідно-конструкторська робота «Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку (ОПУзв) у водному середовищі», у рамках якої створюється еталон [3] і повірочна/ієрархічна схема.

Передавання розміру ОПУзв від первинного еталона вторинному еталону і далі робочим еталонам та робочим засобам вимірювання регламентується повірочною (ієрархічною) схемою (рис. 1),

згідно з якою неперервний ланцюг калібрувань забезпечує простежуваність результату вимірювання до еталонів системи одиниць SI, що здійснюється за допомогою комплексу еталонних ультразвукових випромінювачів (УзВ).

Комплект еталонних УзВ складається з:

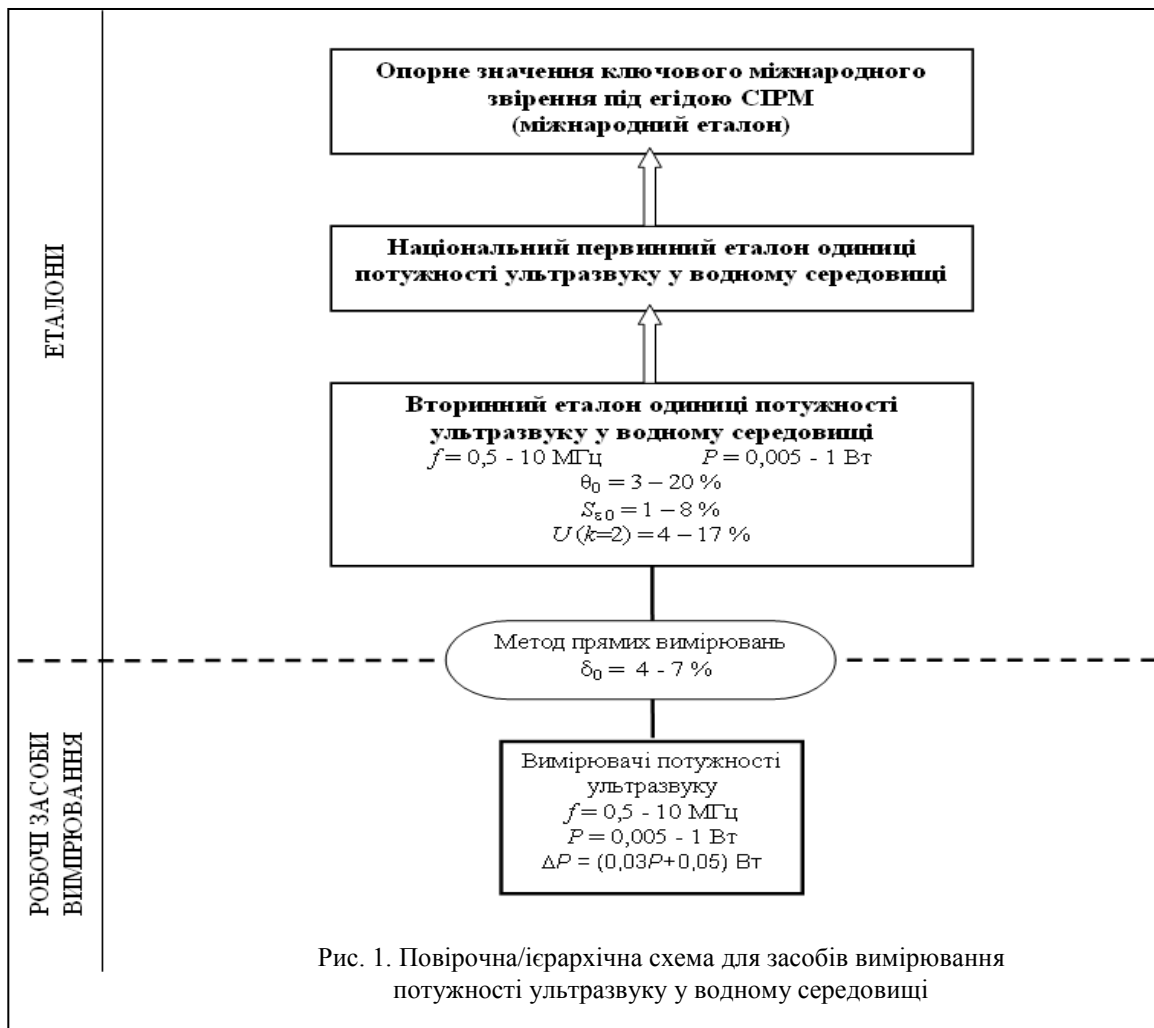
- УзВ призначених для калібрування на первинному еталоні, за допомогою яких калібрують (повіряють) потім апаратуру вторинного еталона;
- робочих УзВ, призначених для калібрування з їх допомогою робочих засобів вимірювання.

Отже, з цього випливає, що головним у цьому ланцюжку калібрувань є УзВ, характеристики точності яких визначають, в основному, характеристики точності результатів вимірювання.

Характеристики точності УзВ в принципі можна визначати і підтримувати різними методами, у тому числі: розраховувати на підставі типових значень електрофізичних і геометричних параметрів його чутливого елемента або за результатами їх експериментального вимірювання, або за рахунок періодичного калібрування УзВ на первинному еталоні і контролю характеристик впродовж міжкалібрувального інтервалу.

Сучасні методи дослідження характеристик непевності вимірювання базуються на модельних функціях (рівняннях вимірювання) і проводяться поетапно [4, 5]:

- а) розробляють фізичну модель процесу вимірювання;
- б) розробляють математичну модель;
- в) оцінюють характеристики непевності, а саме:
  - складають перелік джерел непевності (перелік вхідних величин);
  - визначають їх характеристики точності, закони розподілів та приводять їх до єдиної форми – стандартної непевності;
  - визначають коефіцієнти чутливості та коефіцієнти кореляції (при наявності такої);



– обчислюють внесок кожного джерела непевності (вхідної величини) в непевність вихідної (вимірюваної) величини; визначають сумарну стандартну непевність, обчислюють (приймають) коефіцієнт розширення та визначають розширену непевність;

– обчислюють частки внесків непевностей вхідних величин у сумарну непевність вихідної величини;

г) складають бюджет непевності.

### Фізична модель УзВ

Як еталонні використовують УзВ резонансного типу з одним п'єзокерамічним чутливим елементом (п'єзокерамічним диском). Принцип дії УзВ базується на п'єзоелектричному ефекті поляризованої сегнетоелектричної п'єзокераміки. На вхід УзВ від генератора через підсилювач потужності подають змінну напругу синусоїдальної форми в робочому діапазоні частот. Електрична енергія перетворюється в енергію коливання у чутливому елементі – диску, який і випромінює в середовище (дистильовану воду) акустичні хвилі (ультразвуковий промінь).

Розрахунок характеристик та параметрів УзВ

виконується в рамках певної фізичної моделі, яка визначається конструкцією випромінювача та чутливим елементом. Чутливий елемент еталонного УзВ – тонкий п'єзокерамічний диск із кераміки ЦТС - 19, вільно опирається по контуру на виточку в обоймі, куди він посаджений на клей-герметик (рис. 2) і працює на п'єзожорсткій моді ДВр: вектор поляризації перпендикулярний до площини диску, переміщення паралельне поляризації (резонансний розмір – товщина) (рис. 3).

На основі такої фізичної моделі розроблена математична модель процесу випромінювання акустичної потужності.

### Математична модель

Процес генерування ультразвуку у п'єзокерамічному диску описують наступною системою рівнянь (1) і (2), яка містить рівняння стану п'єзокерамічного середовища, рівняння руху та рівняння вимушеної електростатики [9].

*Рівняння стану* це залежність між механічними напруженнями, деформаціями і електричним полем в умовах однорідності їх в елементарному об'ємі [6 – 9]:

$$\sigma = c_{33}^E \frac{\partial u}{\partial z} - e_{33} E; \quad (1)$$

$$D = \varepsilon_{33}^S E + e_{33} \frac{\partial u}{\partial z},$$

де  $u, \sigma$  – зміщення та напруження, що описують поле пружних деформацій;  $D, E$  – індукція та напруженість електричного поля;  $c_{33}^E, \varepsilon_{33}^S, e_{33}$  – пружні, діелектричні і п'єзоелектричні сталі, відповідно.

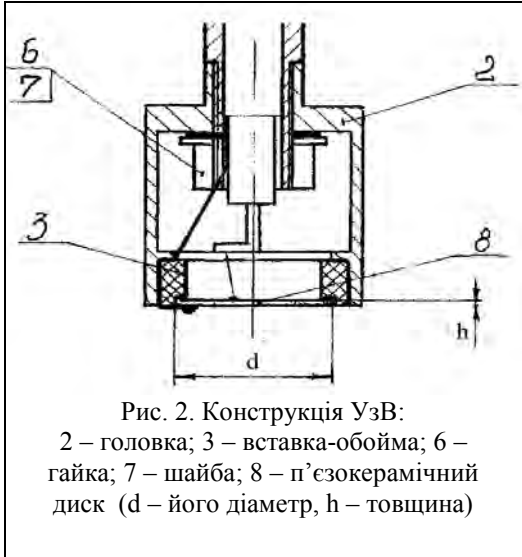


Рис. 2. Конструкція УзВ:  
2 – головка; 3 – вставка-обойма; 6 – гайка; 7 – шайба; 8 – п'єзокерамічний диск ( $d$  – його діаметр,  $h$  – товщина)



Рис. 3. Фізична модель УзВ

Рівняння руху в елементарному об'ємі для нашого випадку буде мати вигляд:

$$\rho_{\pi} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial z}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial D}{\partial z} = 0,$$

де  $\rho_{\pi}$  – густина п'єзокераміки;  $t$  – час.

Рішення системи рівнянь (1) – (2) при трансверсально-ізотропній симетрії диска за рахунок його попередньої поляризації проводиться за граничних умов імпедансного типу:

$$z = \pm 1; \quad \sigma \pm z_a^{\pm} \frac{\partial u}{\partial t} = 0; \quad U_{\pi} Y_e + S \frac{\partial D}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

де  $z_a^{\pm}$  – опір акустичного навантаження, яке прикладене до торців  $z = \pm 1$  активного елемента (диску) ( $l = \frac{h}{2}$ , де  $h$  – товщина);  $Y_e$  – провідність електричного навантаження на активний елемент;  $S$  – площа поверхні диску;  $U_{\pi}$  – електрична напруга, прикладена до п'єзоелемента.

Тоді при гармонійній залежності шуканих величин від часу типу  $\exp(i\omega t)$  розв'язок граничної задачі (1) – (3) має вигляд:

$$-\sigma(l) = U_{\pi} \frac{e_{33}}{2l} \frac{\alpha_a^+ (1-a)(1-av^-)}{1+\alpha_a^+ \Delta_0 - \Delta_1}; \quad (4)$$

$$\alpha_a^{\pm} = \frac{z_a^{\pm}}{z_{\pi}}; \quad z_{\pi} = \sqrt{\rho_{\pi} c_{33}^D}; \quad v^{\pm} = \frac{1 - \alpha_a^{\pm}}{1 + \alpha_a^{\pm}};$$

$$a = e^{-2ik_{\pi} l}; \quad k_{\pi} = \frac{\omega}{c_{\pi}}; \quad c_{\pi} = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho_{\pi}}};$$

$$\Delta_0 = 1 - a^2 v^+ v^-;$$

$$\Delta_1 = \frac{\beta}{4ik_{\pi} l} (1-a) [2 + v^+ + v^- - a(v^+ + v^- + 2v^+ v^-)],$$

де  $\beta$  – відповідне значення квадрата коефіцієнта електромеханічного зв'язку;  $c_{\pi}$  – швидкість звуку у п'єзокераміці;  $c_{33}^D$  – модуль пружності;  $k_{\pi}$  – хвильове число для п'єзокераміки;  $\omega$  – кутова частота; позначення решти величин відповідають позначенням у формулах (1) – (3).

З (4) можна одержати вираз для визначення акустичної потужності, випромінюваної УзВ у водне середовище:

$$P_{\text{ак}} = \frac{1}{2} S_{\pi} \left| \frac{\sigma(l)}{z_a^+} \right|^2 \operatorname{Re} z_a^+, \quad (5)$$

де  $S_{\pi}$  – площа поверхні УзВ.

У числових розрахунках при навантаженні на півпростір, який має місце у нашому випадку використано наступний вираз для опору  $z_a^+$  [9]:

$$z_a^+ = \rho c z_R; \quad z_R = \operatorname{Re} z_R + i \operatorname{Im} z_R; \quad (6)$$

$$\operatorname{Re} z_R = 1 + \exp(-1,148ka);$$

$$\operatorname{Im} z_R = 9,158(ka)^{-3,415}; \quad k = \frac{\omega}{c}$$

для випадку  $ka > 3,5$  –  $\operatorname{Re} z_R = \operatorname{Im} z_R$ .

На частоті механічного резонансу, якщо знехтувати опором механічних втрат, можна отримати спрощений варіант формули (5) для визначення акустичної потужності [10]:

$$P = U_{\pi}^2 \frac{a^2}{h^2} \cdot \frac{2\pi d_{33}^2}{\rho c s_{33}^2}, \quad (7)$$

де  $U_{\pi}$  – електрична напруга на п'єзоелементі;  $a$  –

радіус диску;  $h$  – товщина;  $\rho$  – густина середовища;  $c$  – швидкість звуку в середовищі;  $d_{33}$  – п'єзоелектричний модуль;  $s_{33}$  – пружна податливість п'єзокераміки.

Для УзВ основним параметром є його електроакустична провідність [11, 12], яка залежить від електрофізичних властивостей матеріалу п'єзодиска, його розмірів та акустичної жорсткості середовища (дистильованої води), у яке випромінюється ультразвук:

$$G = \frac{P}{U_p^2} = \frac{a^2}{h^2} \cdot \frac{2\pi d_{33}^2}{\rho c s_{33}^2}. \quad (8)$$

Формули (7) та (8) далі використовуються як модельна функція для числових розрахунків.

### Оцінювання непевності та складання бюджету

Оцінювання непевності проводилось покроково у порядку, зазначеному вище:

Визначалася номенклатура та характеристики точності вхідних величин.

У табл. 1 подано перелік вхідних величин, який крім тих, що явно входять у модельну функцію, доповнений методичною похибкою, пов'язаною з припущеннями та спрощеннями, зробленими під час розроблення математичної моделі, а також іншими впливовими величинами (наприклад, параметри довкілля, температура нагріву п'єзокераміки, температура водного середовища та інше).

Таблиця 1

Перелік вхідних величин

№ з/п	Джерела похибок	Розмірність	Позначення
1	Радіус диска	м	$a$
2	Товщина диска	м	$h$
3	П'єзоелектричний модуль	Кл/Н	$d_{33}$
4	Пружна податливість п'єзокераміки	м <sup>2</sup> /Н	$s_{33}$
5	Густина середовища	кг/м <sup>3</sup>	$\rho$
6	Швидкість звуку в середовищі	м/с	$c$
7	Методична похибка	%	$\Delta_m$
8	Інші впливові величини	%	$\Delta_b$

На підставі апріорної інформації приймалися закони розподілу вхідних величин та обчислювались стандартні непевності вхідних величин  $u(x_k)$ .

Для вхідних величин, які явно входять до модельної функції, коефіцієнти чутливості  $c_k$  шукалися як частинні похідні відповідно до [4, 5]. Для вхідних величин, які не входять явно у модельну функцію, але їх внесок суттєво впливає на кінцевий результат,

коефіцієнти чутливості приймалися рівними одиниці.

Аналіз зв'язків між вхідними величинами не виявив істотної кореляції тому всі джерела непевності в нашому випадку приймалися некорельованими.

Обчислювався внесок кожної вхідної величини  $u_k(y)$  у сумарну стандартну непевність:

$$u_k(y) = c_k \cdot u(x_k). \quad (9)$$

Сумарна стандартна непевність  $u_c$  обчислювалась за формулами:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2; \quad (10)$$

$$u_A = S_{\bar{X}}, \quad (11)$$

де  $u_A$  – стандартна непевність, яка розраховується за типом А;  $S_{\bar{X}}$  – СВК результату вимірювання параметрів п'єзокерамічного диска за багаторазовими незалежними спостереженнями;  $u_B$  – стандартна непевність, яку розраховують за типом В:

$$u_B^2 = \sum_k u_k^2(y), \quad (12)$$

де  $u_k(y)$  – внесок  $k$ -ї вхідної величини у сумарну стандартну непевність.

Обчислювалась розширена непевність  $U$  (при коефіцієнті розширення  $k = 2$ ).

$$U = k \cdot u_c, \quad (13)$$

де  $u_c$  – сумарна стандартна непевність.

Для аналізу структури бюджету непевності обчислювались частки внесків стандартних непевностей вхідних величин у розширену непевність, які дозволяють виявити ті джерела непевності, що вносять найбільший вклад у сумарну непевність вихідної величини:

$$\zeta = \frac{u_k^2(y)}{u_c^2}. \quad (14)$$

Результати згаданих вище розрахунків зводилися у загальну таблицю – бюджет непевності.

В табл. 2 і 3 подано бюджети непевності для двох різних можливих варіантів забезпечення точності.

### Аналіз результатів

Розширена непевність для УзВ становить 50 %, якщо при розрахунку бюджету непевності взяти типові значеннями електрофізичних та геометричних параметрів п'єзокерамічного диску. Домінуючими складовими при цьому є похибка визначення електрофізичних параметрів диску, зокрема п'єзоелектричного модуля та пружної податливості.

При використанні експериментально вимірюваних параметрів диску розширена непевність для УзВ становить 22%. Домінуючою складовою при цьому є методична похибка.

Таблиця 2

Бюджет непевності для УзВ, розрахований на підставі типових значень електрофізичних і геометричних параметрів п'єзокерамічного диску

№ п/п	Вхідні величини						Вихідні величини	
	Позначення величини	Номінальне значення	Характеристики точності (відхилення), %	Закон розподілу	Стандартна непевність, $u(x_k)$ , %	Коефіцієнти чутливості	Внесок, $u_k(y)$ , %	Частка внеску, %
1	a	0,0125	2,0	рівн.	1,15	2	2,30	0,84
2	h	0,0010	10,0	рівн.	5,77	-2	11,54	21,03
3	$d_{33}$	2,0E-10	14,0	рівн.	8,08	2	16,16	41,23
4	$s_{33}$	1,7E-11	12,0	рівн.	6,93	-2	13,86	30,33
5	$\rho$	0,99754	1,00E-05	рівн.	0,00	-1	0,00	0,00
6	c	1493,453	7,00E-05	рівн.	0,00	-1	0,00	0,00
7	$\Delta m$	var	10,00	рівн.	5,77	1	5,77	5,26
8	$\Delta v$	var	5,00	рівн.	2,89	1	2,89	1,32
Сумарна стандартна непевність $u_c$ , %							25,17	
Розширена непевність U, % (k=2)							50,33	

Таблиця 3

Бюджет непевності для УзВ, розрахований за результатами експериментального вимірювання електрофізичних і геометричних параметрів п'єзокерамічного диску

№ п/п	Вхідні величини						Вихідні величини	
	Позначення величини	Номінальне значення	Характеристики точності (відхилення), %	Закон розподілу	Стандартна непевність, $u(x_k)$ , %	Коефіцієнти чутливості	Внесок, $u_k(y)$ , %	Частка внеску, %
1	a	0,0125	0,4	норм.	0,20	2	0,40	0,14
2	h	0,0010	3,0	норм.	1,50	-2	3,00	7,71
3	$d_{33}$	2,0E-10	5,0	норм.	2,50	2	5,00	21,40
4	$s_{33}$	1,7E-11	5,0	норм.	2,50	-2	5,00	21,40
5	$\rho$	0,99754	1,00E-05	рівн.	0,00	-1	0,00	0,00
6	c	1493,453	7,00E-05	рівн.	0,00	-1	0,00	0,00
7	$\Delta m$	var	10,00	рівн.	5,77	1	5,77	28,50
8	$\Delta v$	var	5,00	рівн.	2,89	1	2,89	7,15
9	СКВ		4,00	норм.	4,00	1	4,00	13,70
Сумарна стандартна непевність $u_c$ , %							10,81	
Розширена непевність U, % (k=2)							21,62	

Такі вхідні величини як густина середовища  $\rho$ , швидкість звуку в середовищі  $c$ , які подаються у довідниках з достатньою точністю і такі, що можна виміряти з достатньою точністю (радіус диску  $a$ , товщина диску  $h$ ) вносять незначний внесок у сумарну стандартну непевність.

При калібруванні УзВ на первинному еталоні сумарна стандартна непевність становить 3,5 – 7% [13], в той час як в обох попередніх випадках сумарна стандартна непевність становить порядку 25% в першому випадку і 11% у другому.

Отже, як випливає з викладеного для досягнення вищої точності необхідно еталонні УзВ калібрувати на первинному еталоні.

### Висновки

Проведено дослідження характеристик непевності у вимірюванні еталонного ультразвукового випромінюваа одного з основних елементів системи метрологічного забезпечення вимірювання цієї фізичної величини у країні.

Розглянуто три варіанти:

а) характеристики точності УзВ визначаються за типовими значеннями електрофізичних і геометричних параметрів чутливого елемента;

б) за результатами безпосереднього вимірювання цих параметрів чуливого елемента;

в) шляхом калібрування УзВ на первинному еталоні.

Перший варіант не вимагає спеціальної вимірювальної апаратури, але розширена непевність вимірювання при цьому дуже велика (досягає 50%).

У другому варіанті потрібне спеціальне вимірювальне оснащення для визначення електрофізичних параметрів п'єзокерамічного елемента, але розширена непевність і у цьому варіанті (до 22%) не задовольняє існуючі вимоги.

Третій варіант передбачає розроблення еталонного ультразвукового блоку і точних вимірювальних приладів та періодичного калібрування УзВ на первинному еталоні. Тільки у цьому варіанті є можливість досягнути необхідної точності вимірювання (досягнути стандартної непевності 7%) і підтримувати її впродовж експлуатації, забезпечуючи простежуваність даного виду вимірювання до еталонів одиниць системи SI.

### Список літератури

1. *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes.* – Paris, 14 October 1999. (Угода про Взаємне Визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами (Угода MRA)).

2. Колтак Б. Проблеми забезпечення єдності вимірювань акустичних величин в ультразвуковому діапазоні частот / Б. Колтак, В. Чалий, Т. Ільницька // *Метрологія та прилади.* – 2008. – № 2. – С. 3-9.

3. Чалий В. Адаптивна технологія побудови еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі / В. Чалий, Т. Ільницька, С. Чалий // *Стандартизація, сертифікація, якість.* – 2009. – № 2. – С. 34-38.

4. *ISO/IEC GUIDE EXPRES:1995, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (Настанова з подання непевності у вимірюваннях).*

5. *EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.* – Dec 1999. – 79 p.

6. Мэзон У.П. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке: пер. с англ. / У.П. Мэзон. – М., 1952. – 340 с.

7. *Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У.П. Мэзона.* – М.: Мир, 1966. – 360 с.

8. Улитко А.Ф. К теории колебаний пьезокерамических тел / А.Ф. Улитко // *Тепловые напряжения в элементах конструкций.* – К: Наукова думка, 1975. – Вып. 15. – С. 90-99.

9. *Пьезокерамические преобразователи: справочник / Под ред. С.И. Пугачева.* – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.

10. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения / А.Е. Колесников. – М.: Изд. стандартов, 1970. – 238 с.

11. *Report on the CIPM key comparison CCAUV.U-K1 (ultrasonic power). Final Report.* – October, 2002.

12. *BIPM / CIPM key comparison CCAUV.U-K3, ultrasonic power. Technical protocol.* – October, 2008.

13. *ГОСТ Р 8.616-2006 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений мощности ультразвука в воде в диапазоне частот от 0,5 до 12 МГц.*

Надійшла до редколегії 28.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭТАЛОННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Т.М. Ильницкая, В.П. Чалий, А.И. Кузий

Проведено сравнение трех различных возможных вариантов обеспечения точности при определении и поддержании основных характеристик эталонного ультразвукового излучателя. Представлены физическая и математическая модели ультразвукового излучателя резонансного типа с одним пьезокерамическим чувствительным элементом. Исследованы характеристики неопределенности, составлен бюджет и проведен анализ вариантов; предложен оптимальный.

**Ключевые слова:** эталон, неопределенность, ультразвук, мощность ультразвука, ультразвуковой излучатель.

### RESEARCH OF UNCERTAINTY OF BASIC CHARACTERISTICS OF STANDARD ULTRASONIC TRANSDUCER

T.M. Ilnytska, V.P. Chalyy, A.I. Kuziy

Comparison of three different possible variants of providing of exactness is conducted at determination and maintenance of basic characteristics of standard ultrasonic transducer. The physical and mathematical models of ultrasonic transducer of resonance type with one piezoceramics sensitive element are presented. Characteristics of uncertainty are investigated and budgeted, the analysis of variants is conducted; optimal one is offered.

**Keywords:** standard, uncertainty, ultrasonic, ultrasonic power, ultrasonic transducer.