

УДК 534:321.9:534.6

В.В. Паракуда, Б.Д. Колпак, В.П. Чалый, Т.М. Ильницькая

ГП науково-дослідницький інститут «Система», Львів, Україна

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА PUMA ПРИ ПОСТРОЕНИИ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ УЛЬТРАЗВУКА

*Показана возможность применения метода PUMA для обоснования структуры и состава измерительных каналов на начальной стадии создания эталона единицы мощности ультразвука. Представлены структурно-функциональная схема эталона и формула для перерасчета характеристик точности, заданных доверительными границами погрешности и среднеквадратическим отклонением случайной погрешности, в термины расширенной неопределенности.*

**Ключевые слова:** метод PUMA, эталон, мощность ультразвука, неопределенность, электроакустическая проводимость.

### Введение

Метод «PUMA», как известно [1], используется, в основном, при разработке методик исполнения измерений. Это процедура управления неопределенностью (Procedure for Uncertainty Management), – практический, итеративный метод оценки и представления неопределенности в измерениях. Итеративный метод основывается на стратегии верхнего предела, то есть на переоценивании неопределенности на всех уровнях, но при итеративном контроле результата переоценки.

### Основной материал

Нами метод PUMA был применен на начальной стадии создания эталона единицы мощности ультразвука в водной среде соответственно с заданными характеристиками точности для обоснования структуры и состава измерительных каналов.

Ультразвук сегодня широко используется в химической, пищевой, фармацевтической, металлургической промышленности, в строительной индустрии, в навигации, звукоподводной связи, в геофизических исследованиях, например в исследовании свойств горных пород, исследовании скважин, при решении различных измерительных задач, в различных отраслях медицины (диагностике, физиотерапии, хирургии) и во многих других отраслях народного хозяйства и социальной сферы.

Представление про масштабы и тенденции использования ультразвука можно составить с того, что в США, например, рынок ультразвуковых технологий в 2006 г. оценивался в 3,6 млрд. дол. США с годовым приростом 8,5% и прогнозируется до 5,35 млрд. в 2008 г., в том числе, годовой прирост выпуска медицинской ультразвуковой аппаратуры – 9,7%. В соответствии с оценками зарубежных специалистов в мире сегодня насчитывается 250 000 диагностических ультразвуковых приборов, на ко-

торых проводится до 250 млн. экспертиз в год [2].

На сегодняшний день в Украине метрологическое обеспечение измерений в области мегагерцового (медицинского) ультразвука в водной среде находится почти в зародыше: существуют лишь отдельные элементы, а самой системы метрологического обеспечения, как таковой, не существует; отсутствуют первичные эталоны, нет поверочной схемы передачи размера единиц физических величин, которые характеризуют ультразвук (не обеспечена прослеживаемость результатов измерений).

ДП НДИ «Система» начало создание вторичного эталона единицы мощности ультразвука у водной среде. Согласно технического задания рабочий диапазон частот должен находиться в пределах от 0,5 МГц до 20 МГц, диапазон воспроизведения ультразвуковой мощности должен быть в пределах 5 мВт – 1 Вт. При этом границы основной неисключенной погрешности эталона при доверительной вероятности  $P = 0,99$  должны находиться в пределах от 3% до 20%; среднее квадратичное отклонение результата измерений при передаче единицы мощности – от 1% до 8%; расширенная неопределенность (при коэффициенте расширения 2) – от 4% до 17% (в зависимости от частоты и уровня мощности).

Обоснование структуры и состава эталона методом PUMA проводится поэтапно следующим образом:

#### Первая итерация.

1. Соответственно выбранному для реализации в эталоне методу измерения мощности ультразвука и принципу его действия создается физическая модель измерения (рис. 1). Соответственно этой модели процесса измерения ультразвуковой мощности была разработана математическая модель.

Соотношение, связывающее значение радиационной силы  $F$ , которая действует на мишень, со значением исходной акустической мощности  $P$  ультразвукового электроакустического преобразователя

(ЕАП) приведено в міжнародному стандарті ІЕС 61161 [3]. Однак ці формули справедливі для суттєво упрощеної ситуації і можуть використовуватися тільки при вимірюваннях на робочих середствах. Тому для еталона, ґрунтуючись на теоретичних дослідженнях, розроблена більш адекватна математична модель.

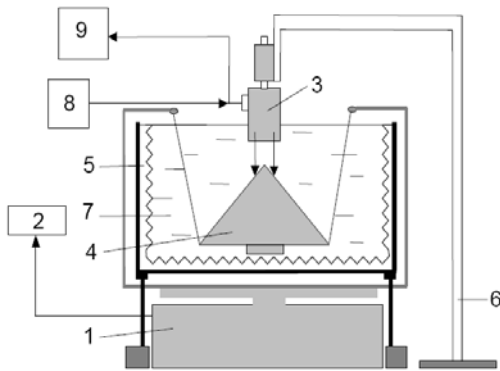


Рис. 1. Фізична модель вимірювання ультразвукової потужності в водній середі методом балансу сил: 1 – ваги; 2 – контроль ваг; 3 – випромінювач; 4 – ціль, підвішена на рамці; 5 – звукопоглинаюче покриття; 6 – штатив; 7 – бак з водою на підставці; 8 – генератор посилювачем потужності; 9 – вимірник напруги

При використанні цільової мишені, яку можна вважати поглинаючою, тобто з коефіцієнтом відбиття менше 5%, в діапазоні частот від 0,5 МГц до 5 МГц для визначення акустичної потужності  $P$  доцільно використовувати формули:

для плоскої мишені:

$$P = c \cdot F \left( 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) \left( 1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka) \right)^{-1}; \quad (1)$$

для конічної мишені:

$$P = \frac{c \cdot F}{2 \cos^2 \vartheta} \left( 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) \left( 1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka) \right)^{-1}, \quad (2)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad l = \frac{c}{f}, \quad (3)$$

де  $J_n$  – функція Бесселя 1-го порядку  $n$ ;  $a$  – радіус ЕАП;  $k$  – хвильове число,  $\lambda$  – довжина акустичної хвилі;  $f$  – частота.

В високочастотному діапазоні (вище 5 МГц), коли коефіцієнт відбиття більше 5%, для визначення акустичної потужності  $P$  доцільно використовувати формулу:

$$P = cF \frac{\alpha^2 a^2 e^{\alpha d}}{\left[ 1 - e^{-\alpha a} (\alpha a + 1) \right] (2\beta \cos^2 d + \gamma)}, \quad (4)$$

де  $d$  – відстань від вершини конуса мишені до активної площини ЕАП;  $v + \gamma + e = 1$  – частотно-залежні для мишені коефіцієнти відбиття ( $\beta$ ), поглинання ( $\gamma$ ) і пропускання ( $\epsilon$ );  $\alpha$  – частотно-залежний коефіцієнт поглинання.

Так як потужність випромінюваного ультразвуку залежить від рівня електричного напруги, яке подається на ультразвуковий випромінювач, то при міжнародних порівняннях національних еталонів оцінюється не тільки потужність, але і електроакустична провідність випромінювача. Електроакустична провідність випромінювача  $G$  являє собою частину від ділення вихідної ультразвукової потужності  $P_{out}$  на квадрат діючого значення вхідного напруги  $U_{in}$ , тобто:

$$G = \frac{P_{out}}{U_{in}^2}. \quad (5)$$

Характеристики точності визначення електроакустичної провідності ультразвукового випромінювача, таким чином, є основними характеристиками еталона, і ними оцінюється еквівалентність еталона.

2. ґрунтуючись на основних заданих параметрах еталона (діапазон частот і потужностей) і характеристиках точності, а також зібраної апріорної інформації, розробляється попередній варіант структурної схеми еталона (рис. 2), вимірні канали, забезпечуючи електричну, конструктивну, інформаційну і метрологічну сумісність окремих компонентів вимірних каналів.

3. Відповідно уточненої математичної моделі і попередньо обраної структурної схеми аналізуються всі можливі джерела невизначеності, проводиться аналіз всієї доступної інформації про характеристики точності вхідних величин (інформативних параметрів і впливаючих величин). Характеристики точності приводяться до єдиної форми – к стандартній невизначеності.

Діло в тому, що на перших стадіях створення еталона (в умовах апріорної невизначеності), коли ще не розроблена його конструкція, не можуть бути проведені експериментальні дослідження і оцінені характеристики точності, будь-яка існуюча інформація, стосуючись точності характеристик процесу вимірювання при виробництві одиниці вимірювання на еталоні, має велику цінність. К сожалению, різні джерела інформації про характеристики точності дають різними способами:

– в термінах невизначеності, згідно „Руководству по вираженню невизначеності вимірювання” [4] (стандартної, розширеної);

– в формі характеристик точності, згідно ГОСТ 8.207, ГОСТ 8.061, ГОСТ 8.381, МИ 1.317 і т.д. (інтервальних і/або точних оцінок): неісключенної систематичної похибки (межі з визначеним законом розподілу і рівнем довірливої ймовірності або середньоквадратич-

ным отклонением) случайной погрешности, характеристик основной погрешности и дополнительных погрешностей, пределов допустимой погрешности,

доверительных границ погрешностей при разных уровнях доверительной вероятности;  
– в форме допустимых отклонений.



Рис. 2. Структурная схема эталона (первый предварительный вариант)

В большинстве случаев нормативный документ РМГ 43-2001 [5] и ряд публикаций дают надежные рекомендации о пересчете характеристик точности, которые даны в терминах погрешности, в характеристики в терминах неопределенности. Но когда точность характеризуется пределами доверительной погрешности и СКО случайной погрешности, то возникают определенные трудности.

Проведенные расчеты на основе требований ГОСТ 8.381 [6], ГОСТ 8.207 [7] и РМГ 43-2001 [5] показали, что в том случае, если стандартная неопределенность, определяемая по типу А  $u_A = S_{\bar{x}}$ , и закон распределения плотности вероятности входных величин возможно аппроксимировать равномерным, то расширенная неопределенность U при доверительной вероятности  $P = 0,95$  (коэффициент расширения  $k = 2$ ) определяется формулой:

$$U = \delta \frac{k}{t_{\Sigma 0}}, \quad (6)$$

где  $t_{\Sigma 0}$  – коэффициент расчета доверительных границ погрешности результата измерения.

Коэффициенты  $t_{\Sigma 0}$  определяют числовым способом при условии:

$$\left\{ t_{\Sigma} \left[ 1 + \sqrt{(\beta/t_{\Sigma})^2 - 1} \right] - k_i \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{(\beta/t_{\Sigma})^2 - 1} - t \right\} \Rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $\beta = \delta/S_{\bar{x}}$ ;  $k_i = 1,4$  при доверительной вероятности  $P = 0,99$ ;  $t$  – коэффициент Стьюдента; ( $t = 4,604$  при  $n = 5$ ,  $P = 0,99$ ).

4. Основываясь на изложенных выше расчетах, составляют в форме таблицы бюджет неопределенности первой итерации, конечным результатом которого является расширенная неопределенность измерения по предварительно выбранной структурной схеме эталона и долей вкладов каждого из источников в суммарную неопределенность выходной величины, в нашем случае в электроакустическую проводимость ультразвукового излучателя.

Как пример рассмотрим бюджет неопределенности для диапазона частот от 0,5 МГц до 5 МГц для идеально отражающей мишени с углом  $\vartheta = 45^0$ , мощность равна 1 Вт (табл. 1).

При составлении таблицы использовались разные источники информации о характеристиках точности входных величин (технические документы на приборы, справочники, международные стандарты, а именно IEC 61161 [1], отчеты о международных сличениях, техническая литература).

При расчете коэффициентов чувствительности были использованы:

- аналитический метод соответственно [4]. Коэффициенты чувствительности равны частным производным (дифференцировали выражения (2) и (5));
- метод так называемого «черного ящика» (black box method), который позволяет использовать метод PUMA. Коэффициент чувствительности принимаем равным единице.

Еще одной особенностью при использовании

метода PUMA является то, что при оценке неопределенности можем принять закон распределения равномерным, а все источники неопределенности рассматриваются как некоррелированные, то есть с коэффициентом корреляции  $\gamma = 0$ .

5. Расширенная неопределенность, рассчитана таким образом, сопоставляется с требованиями ТЗ. Если требования при первом варианте структурной

схемы не удовлетворяются, тогда анализируют доли вкладов и проводят поиск путей усовершенствования структурной схемы эталона, и, в случае необходимости, математической модели – выполняется вторая итерация.

В нашем примере после первой итерации расширенная неопределенность, полученная методом PUMA, не попадает в заданный диапазон.

Таблица 1

Бюджет неопределенности (первая итерация)

№ п/п	Влияющая величина	Обозначение	Единицы измерения	Номинальное (диапазон) значение	Характеристики точности (входящие), %	Коэффициент чувствительности	Стандартная неопределенность, %	Вклад, %	Доля вклада, %
1	Частота	$f$	МГц	(0,5-5) МГц	$2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$	-0,5	0,00	0,00	0,00
2	Скорость звука в воде	$c$	м/с	1493,435	0,00007	1	0,00	0,00	0,00
3	Угол между направлением распространения входящей волны и нормально отражающей (конической) поверхности (выпуклая поверхность)	$\vartheta_0$	градус	45	$\pm 3,5$	1	2,02	2,02	1,66
4	Радиус ультразвукового излучателя	$a$	мм	13,5	$\pm 3,7$	0,16	2,14	0,34	0,05
5	Плотность жидкости (дистиллированная вода)	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	0,997540	0,00001	1	0,00	0,00	0,00
6	Расстояние между вершиной конуса мишени и площадью излучателя	$d$	мм	var	0,6	1	0,35	0,35	0,05
7	Ускорение земного притяжения	$g$	м/с <sup>2</sup>	9,81066	0,00010	1	0,00	0,00	0,00
8	Температура	$T$	°C	23	$\pm 0,2$	1	0,12	0,12	0,01
9	Радиус мишени	$b$	мм	41	$\pm 2$	1	1,16	1,16	0,55
10	Нецентрированность ультразвукового луча и мишени				$\pm 3$	1	1,73	1,73	1,22
	- перпендикулярность	$N_p$	мм	$\pm 3$					
	- отклонение от соосности	$N_{en}$	градус	$\pm 3$					
11	Весы III кл.	$m$	г	0,02-0,068	14,71-50	1	10,19	10,19	<b>42,26</b>
12	Напряжение на ЕАП	$U$	В	var	10	2	5,77	11,54	<b>54,21</b>
Суммарная стандартная неопределенность $u_c$ , %								<b>15,67</b>	
Расширенная неопределенность $U$ , %								<b>31,34</b>	

Таблица 2

Бюджет неопределенности (вторая итерация)

№ п/п	Влияющая величина	Обозначение	Единицы измерения	Номинальное (диапазон) значение	Характеристики точности (входящие), %	Коэффициент чувствительности	Стандартная неопределенность, %	Вклад, %	Доля вклада, %
1	Частота	$f$	МГц	(0,5-5) МГц	$2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$	-0,5	0,00	0,00	0,00
2	Скорость звука в воде	$c$	м/с	1493,435	0,00007	1	0,00	0,00	0,00
3	Угол между направлением распространения входящей волны и нормально отражающей (конической) поверхности (выпуклая поверхность)	$\vartheta_0$	градус	45	$\pm 3,5$	1	2,02	2,02	39,70
4	Радиус ультразвукового излучателя	$a$	мм	13,5	$\pm 3,7$	0,16	2,14	0,34	1,12
5	Плотность жидкости (дистиллированная вода)	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	0,997540	0,00001	1	0,00	0,00	0,00
6	Расстояние между вершиной конуса мишени и площадью излучателя	$d$	мм	var	0,6	1	0,35	0,35	1,19
7	Ускорение земного притяжения	$g$	м/с <sup>2</sup>	9,81066	0,00010	1	0,00	0,00	0,00
8	Температура	$T$	°C	23	$\pm 0,2$	1	0,12	0,12	0,14
9	Радиус мишени	$b$	мм	41	$\pm 2$	1	1,16	1,16	13,09
10	Нецентрированность ультразвукового луча и мишени				$\pm 3$	1	1,73	1,73	29,12
	- перпендикулярность	$N_p$	мм	$\pm 3$					
	- отклонение от соосности	$N_{en}$	градус	$\pm 3$					
11	Весы III кл.	$m$	г	0,02-0,068	0,74-2,5	1	0,51	0,51	2,53
12	Напряжение на ЕАП	$U$	В	var	2-4	2	0,58	1,16	13,09
Суммарная стандартная неопределенность $u_c$ , %								<b>3,21</b>	
Расширенная неопределенность $U$ , %								<b>6,42</b>	

Наибольший вклад в расширенную неопределенность вносят: напряжение на ЕАП и весы III кл.

Таким образом, для уменьшения расширенной неопределенности необходимо в состав эталона включить для измерения напряжения на ЕАП вольтметр с погрешностью 2 – 4 % и весы I кл.

**Вторая итерация.**

Процедура выполнения второй итерации аналогична процедуре первой итерации за исключением

того, что рассматривается при этом усовершенствованная структурная схема и, соответственно, уточняется бюджет неопределенности (табл. 2).

Если на второй и последующих итерациях не достигнуты заданные характеристики точности, то есть современный уровень развития науки и техники не позволяет выполнить требования, заданные в ТЗ, или не достаточно выделенных ресурсов для создания эталона этим методом, то рассматриваются

другие методы воспроизведения единицы измерения. А если и этот путь не дает положительных результатов, то ставится вопрос об увеличении ресурсов (объемов финансирования) или о снижении требований точности. После второй итерации расши-

ренная неопределенность методом PUMA попадает в заданный диапазон. Поэтому структура вторичного эталона единицы мощности ультразвука в водной среде подана в виде структурно-функциональной схемы, представленной на рис. 3.

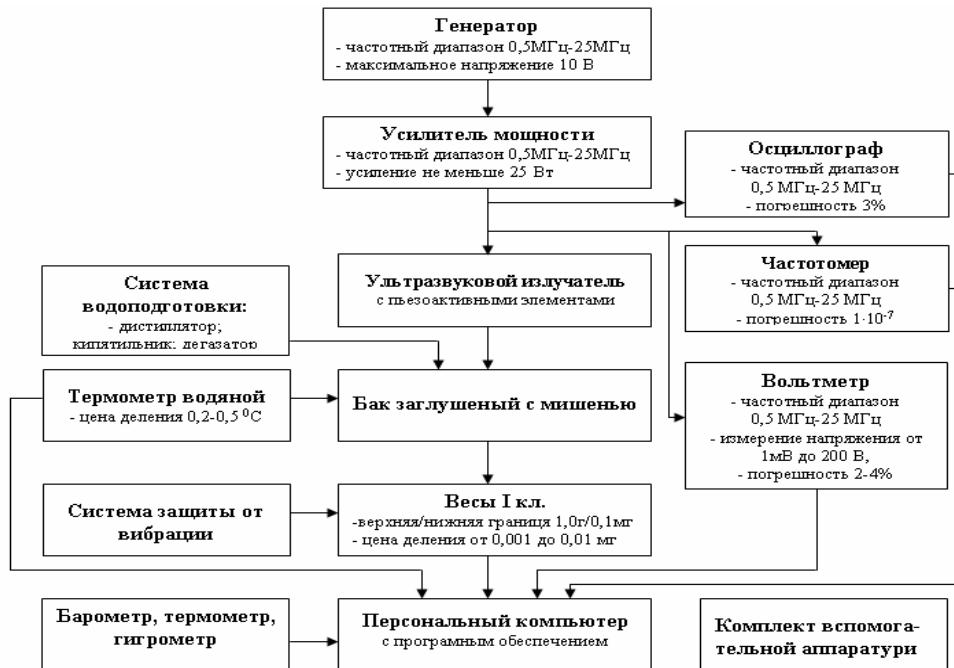


Рис. 3. Структурно-функциональная схема эталона единицы мощности ультразвука

## Список литературы

1. Христо Радев. Менеджмент неопределенности // Тезы лекций школы-семинару «Обработка результатов измерений и оценивание неопределенности при выполнении метрологических работ». – X. – 2007. – С. 53-97.
2. Acoustical Metrology Programme 2004-2007 – NPL Teddington, UK.
3. IEC 61161:1998 Ultrasonic power measurement in liquids in the frequency range 0,5 MHz to 25 MHz (Измерение ультразвуковой мощности в жидкостях в диапазоне частот от 0,5 до 25 МГц).
4. ISO/IEC GUIDE EXPRES:1995, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (Настанова з подання невизначеності у вимірюваннях).

5. РМГ 43-2001. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
6. ГОСТ 8.381. ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешности.
7. ГОСТ 8.207. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдения. Основные положения.

Поступила в редколлегию 18.04.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ PUMA ПРИ ПОБУДОВІ ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ

Пракуда В.В., Колпак Б.Д., Чалий В.П., Ільницька Т.М.

Показана можливість застосування методу PUMA для обґрунтування структури і складу вимірювальних каналів на початковій стадії створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. Подано структурно-функціональну схему еталона та формулу для перерахунку характеристик точності, заданих довірчими границями похибки та середньоквадратичним відхиленням випадкової похибки, у терміни розширеної непевності.

**Ключові слова:** метод PUMA, еталон, потужність ультразвуку, невизначеність, електроакустична провідність.

## APPLICATION OF PUMA METHOD AT CREATION OF THE STANDARD OF A POWER UNIT OF ULTRASOUND

Paracuda V.V., Kolpak B.D., Chalyy V., P. Il'nytska T.M.

The opportunity of application of PUMA method for a substantiation of structure and composition of measuring channels at an initial stage of creation of the standard of a power unit of ultrasound is shown. The structure-functional design of the standard and the formula for recalculation of characteristics of accuracy, which are set by borders of confidential probability and standard deviation of a casual error, in terms of the expanded uncertainty is submitted.

**Keywords:** method of PUMA, standard, power of ultrasound, uncertainty, electro-acoustic conductivity.