

# АДАПТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

**В. Чалий**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник акустичної лабораторії,  
**Т. Ільницька**, науковий співробітник, ДП «НДІ «Система», м. Львів,  
**С. Чалий**, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

## АДАПТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

В. Чалий, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник акустической лаборатории,  
 Т. Ильницкая, научный сотрудник, ДП «НИИ «Система», г. Львов,  
 С. Чалий, доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков

## THE ADAPTIVE TECHNOLOGY OF DESIGNING OF THE ULTRASOUND POWER UNIT STANDARD IN WATER MEDIUM

V. Chalyy, Candidate of Technical Sciences, Senior Scientist, Acoustic Laboratory Head,  
 T. Il'nitska, Scientist, «Systema» Research Institute» State Enterprise, Lviv,  
 S. Chalyy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio and Electronics, Kharkiv

У статті раніше розроблені авторами методи та інформаційна технологія створення еталонів одиниць вимірювання в умовах обмежених ресурсів застосовано для обґрунтування і вибору основних параметрів та схемо-технічних рішень при побудові еталона одиниці потужності ультразвуку (УЗ) у водному середовищі.

### ВСТУП

**УЗ** на сьогодні широко використовується в багатьох галузях народного господарства та соціальній сфері (хімічній, харчовій, фармацевтичній, металургійній промисловості, у будівельній індустрії, під час розв'язання різноманітних вимірвальних завдань тощо) та різних галузях медицини (діагностиці, фізіотерапії, хірургії).

Метрологічне забезпечення вимірювання у галузі мегагерцового (медичного) УЗ у водному середовищі в Україні на сьогодні розроблене не достатньо. Наявні лише окремі елементи, але системи метрологічного забезпечення не існують: відсутні первинні та вторинні еталони, немає

державної повірочної схеми передавання розмірів одиниць фізичних величин, які характеризують УЗ, тобто не забезпечена простежуваність результатів вимірювання до національних еталонів одиниць системи SI. Тому створення еталона одиниці потужності



В. Чалий



Т. Ільницька



С. Чалий



УЗ включено в Державну програму розвитку еталонної бази на 2006—2010 роки і в плани дослідницько-конструкторських робіт ДП НДІ «Система».

**ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Відповідно до викладеного, актуальною є проблема розроблення вторинного еталона одиниці потужності УЗ у водному середовищі, що потребує розроблення адаптивної технології побудови еталона одиниці потужності УЗ у водному середовищі. Зазначена технологія повинна забезпечити розроблення, уточнення й удосконалення фізичної та математичної моделі еталона, а також оцінювання невизначеності.

**АДАПТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ЕТАЛОНА**

Розроблення вторинного еталона одиниці потужності УЗ у водному середовищі проводилося відповідно до запропонованої адаптивної технології з ітеративним уточненням адекватної модельної функції згідно з [1]. Запропонована технологія складається з трьох ітерацій та передбачає розроблення і уточнення фізичної та математичної моделей еталона:

**1. Перша ітерація**

**а) аналіз апріорної інформації та вибір принципу відтворення одиниці вимірювання**

На основі зібраної інформації, для реалізації в еталоні одиниці потужності УЗ у воді було вибрано метод балансу радіаційних сил, рекомендований міжнародним стандартом [2]. Переваги методу у тому, що він не залежить від частоти УЗ пучка за умови відповідної корекції на поглинання УЗ, яке виникає на його шляху від випромінювача до мішені. Цей метод, що детально вивчено та описано у літературі, застосовується у державних еталонах США, Великобританії, Німеччини, Канади та інших країнах, дозволяє відтворювати одиницю потужності УЗ у діапазоні від тисячних долей Вт до десятків Вт у діапазоні частот від 0,8 до 25 МГц.

**б) фізична модель**

На основі заданих основних параметрів еталона (діапазону частот і потужностей), характеристик точності, зібраної апріорної інформації та вибраного принципу відтворення одиниці вимірювання (ОВ) розробляється фізична модель і попередній варіант його структурної схеми.

Розгляньмо спрощену фізичну модель вимірювання УЗ потужності у водному середовищі методом балансу сил (рис. 1).

УЗ випромінювач 1 занурено у дистильовану воду в бачку 3, активується від генератора 5 електричних сигналів у діапазоні мегагерцових частот і випромінює УЗ промінь, який, взаємодіючи з мішенню 2, і створює радіаційну силу  $F$ . Радіаційна сила з мішені через підвіски передається на вагу 4.

На першій ітерації розглядався спрощений варіант структури еталона, який включав лише генератор, підсилювач потужності, УЗ випромінювач, бак з мішенню, вагу III класу і систему водопідготовки. Вартість створення такого еталона мінімальна.

**в) математична модель**

Співвідношення, яке пов'язує значення радіаційної сили  $F$ , що діє на мішень, із значенням вихідної акустичної потужності  $P$  УЗ випромінювача встановлено у міжнародному стандарті [2]:

для ідеально абсорбуючої мішені:

$$P = c \cdot F, \tag{1}$$

для ідеально відбиваючої мішені:

$$P = \frac{c \cdot F}{2 \cdot \cos^2 \theta}, \tag{2}$$

де  $c$  — швидкість звуку у воді;

$\theta$  — кут між напрямком розповсюдження УЗ хвилі та нормаллю відбиваючої (конічної) поверхні.

**г) оцінювання невизначеності методом PUMA (Procedure for Uncertainty Management)**

Відповідно до [3] розраховують долі вклади кожного із джерел невизначеності у розширену невизначеність та складають бюджет невизначеності (рис. 2).

Перша ітерація досить груба, виконувалась на основі спрощеної математичної моделі з метою попереднього оцінювання розширеної невизначеності та зіставлення її з вимогами технічного завдання (ТЗ) на створення еталона, а також з метою виявлення домінуючих складових невизначеності. У нашому випадку розширена невизначеність на першій ітерації склала приблизно 39 % і виявилася значно більшою за задану в ТЗ.

За даної фізичної моделі ресурси, необхідні на створення еталона, не перевищують виділений ліміт.



Рис. 1. Фізична модель вимірювання УЗ потужності у водному середовищі методом балансу сил. Перша ітерація



**д) прийняття рішення щодо напрямку подальшої роботи над створенням еталона**

Отже, необхідно було знайти шляхи зменшення розширеної невизначеності і провести другу ітерацію.

**2. Друга ітерація**

**а) аналізування бюджету невизначеності та пошук шляхів зменшення невизначеності вхідних величин**

Аналіз результатів першої ітерації показав, що домінуючими складовими є неточність вагів III класу, розширена невизначеність у вимірюванні яких становить 17 % та випадкова складова, яка може досягати 8 % (рис. 2).

Отже, для зменшення розширеної невизначеності необхідно було провести пошук і включити до складу еталона вагу підвищеної точності. Для зменшення випадкової складової невизначеності необхідно було ідентифікувати її можливі джерела і прийняти такі рішення при виборі структурної схеми, розробленні конструкції еталона, програмного забезпечення і облаштуванні еталонної кімнати, які дозволять значно знизити випадкову складову похибки вимірювання.

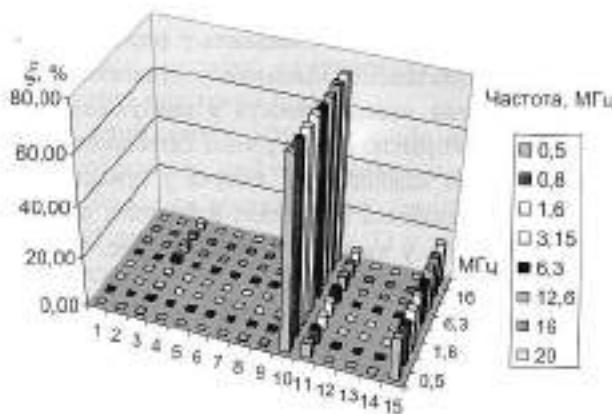


Рис. 2. Гістограма долей вкладів  $\xi$  джерел невизначеності залежно від частоти при потужності 5 мВт. Перша ітерація: розширена невизначеність у вимірюванні ( $k=2$ )  $U=39\%$

**Примітка.** На рис. 2, 5, 7 по осі абсцис подано джерела невизначеності; їх номери відповідають номерам у таблиці; номер 15 — СКВ випадкової невизначеності. По осі ординат відкладена робоча частота

**б) удосконалення фізичної моделі**

На рис. 3 подано удосконалену фізичну модель вимірювання УЗ потужності у водному середовищі методом балансу сил. Відповідно до цієї моделі було розроблено нову структурно-функціональну схему, до якої уведено вагу 1 класу, систему захисту від акустичних перешкод і вібрацій, вольтметр для контролю стабільності напруги на вході УЗ випромінювача (ЕАП), термометр водяний для контролю зміни температури води (рис. 4).

ньювача (ЕАП), термометр водяний для контролю зміни температури води (рис. 4).

**в) уточнення математичної моделі**

Формули (1) і (2) наближені; одержані у припущенні, що первісне акустичне поле представлено плоскою хвилею; середовище, в якому формується акустичне поле, вважається ідеальним: поглинання енергії хвилі та в'язкість у ньому відсутні; відбивання (або поглинання) є абсолютним при взаємодії хвилі з мішенню. Ці формули використовують лише при робочих вимірюваннях.

Тому нами на основі теоретичних досліджень проводилось поступове уточнення модельної функції [3, 4] і для частот до 5 МГц замість виразів (1) і (2) одержана модельна функція вимірювання потужності такого вигляду:

- для абсорбуючої мішені

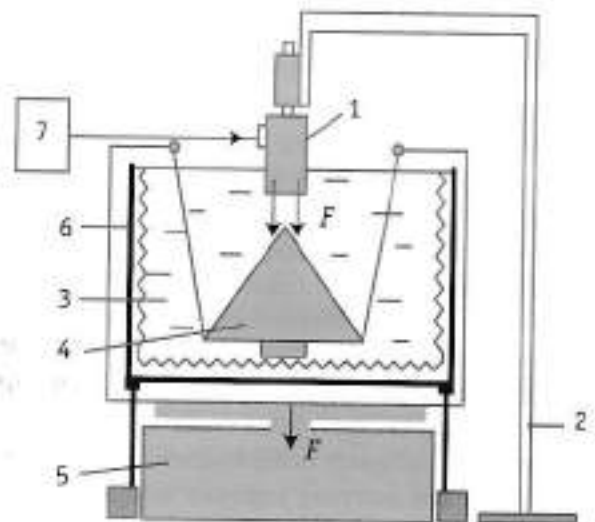
$$P = c \cdot F \left( 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) \left( 1 - J_2^2(ka) - J_0^2(ka) \right)^{-1}; \quad (3)$$

- для відбиваючої мішені

$$P = \frac{c \cdot F}{2 \cos^2 \theta} \left( 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) \left( 1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka) \right)^{-1}; \quad (4)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c}{f}; \quad (5)$$

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



1 — УЗ випромінювач (ЕАП); 2 — штатив; 3 — бачок з водою на підставці; 4 — мішень, підвішена на рамі; 5 — вага; 6 — звукопоглинаюче покриття; 7 — генератор з підсилювачем потужності

Рис. 3. Фізична модель вимірювання УЗ потужності у водному середовищі методом балансу сил. Друга ітерація

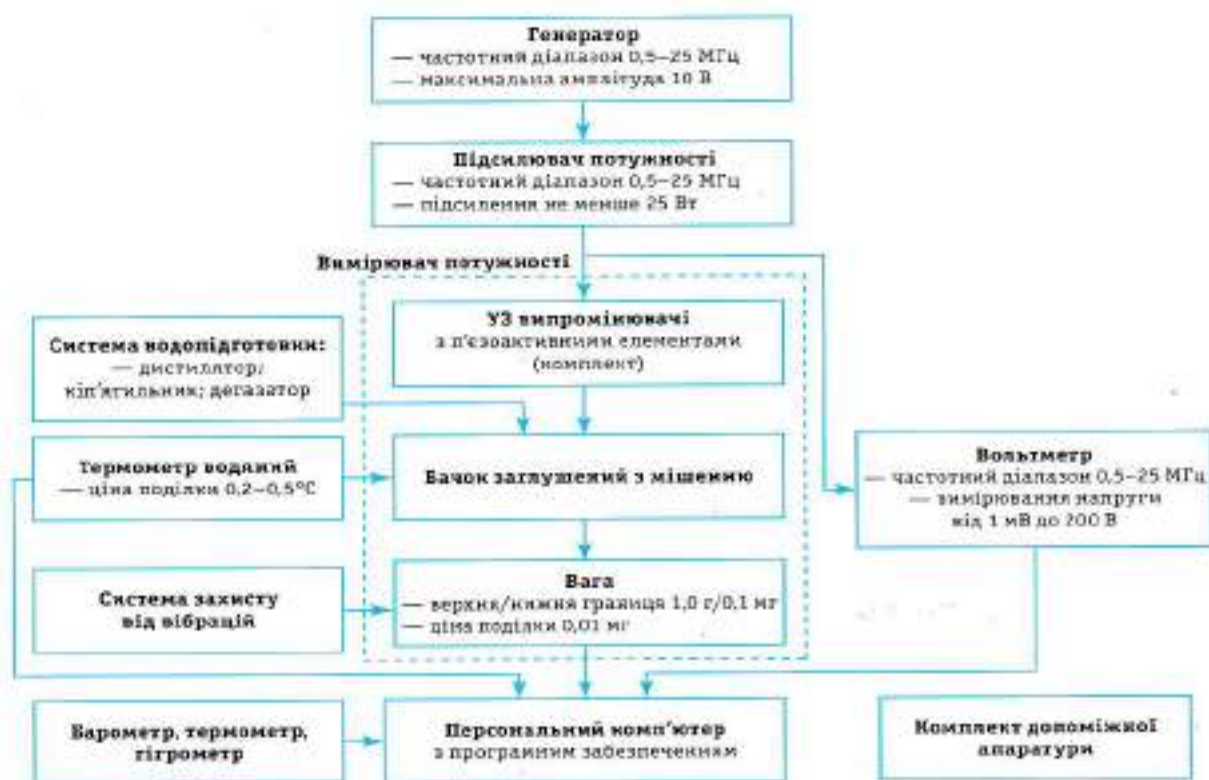


Рис. 4. Структурна схема вторинного еталона одиниці потужності УЗ. Друга ітерація

У діапазоні вище 5 МГц:

$$P = cF \frac{\alpha^2 a^2 e^{\alpha d}}{[1 - e^{-\alpha d} (\alpha a + 1)] (2\beta \cos^2 \vartheta + \gamma)} \quad (6)$$

де  $d$  — відстань між вершиною конуса мішені та активною площиною ЕАП;

$\beta, \gamma, \epsilon$  — коефіцієнти відбивання, поглинання і пропускання для мішені,  $\beta + \gamma + \epsilon = 1$ ;

$\alpha$  — частотно-залежний коефіцієнт поглинання середовища.

**г) порядок оцінювання невизначеності удосконаленим методом PUMA**

Удосконалений метод PUMA передбачає поєднання методів чорного ящика («black box») і прозорого ящика («transparent box») [5] та методів числового диференціювання і/або методів імітаційного моделювання (методу Монте-Карло) [6] під час розрахунку невизначеності.

Відповідно до уточненої математичної моделі і попередньо вибраної структурної схеми аналізують всі можливі додаткові джерела невизначеності, збирають і аналізують всю доступну апріорну інформацію щодо характеристик точності інформативних параметрів і впливових величин, складають перелік вхідних величин за формою таблиці. Використовують різні джерела інформації: технічну документацію на прилади, довідники, міжнародні стандарти і нормативні документи, звіти про міжнародні зібрання, технічну літературу тощо. Характеристики точності приводять до єдиної форми — до стандартної невизначеності.

На основі розрахунків складають у формі таблиці бюджет невизначеності, кінцевим результатом якого є розширена невизначеність у вимірюванні за попередньо вибраною структурною схемою еталона та долі вкладів кожного із її джерел у сумарну невизначеність вихідної величини. Крім того, для наочності подають у вигляді гістограми (рис. 5) долі вкладів джерел невизначеності.

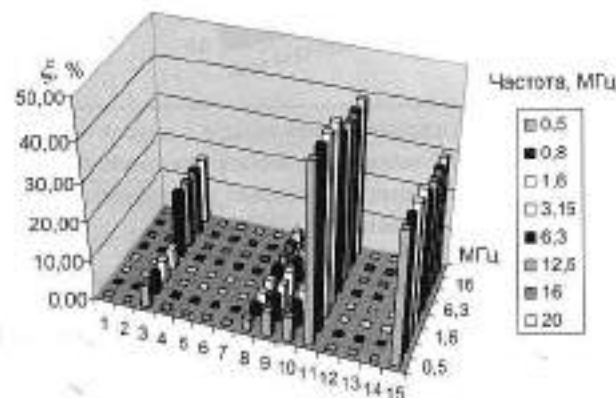


Рис. 5. Гістограма долей вкладів  $\xi$  джерел невизначеності залежно від частоти при потужності 5 мВт. Друга ітерація: розширена невизначеність у вимірюванні ( $k = 2$ )  $U = 14\%$

За результатами другої ітерації, одержана розширена невизначеність лише в деяких піддіапазонах вимірювання незначно перевищує задану у ТЗ.



Ч/ч	Вхідна величина	Позначення	Одиниці вимірювання
1	Частота	$f$	МГц
2	Швидкість звуку у воді	$c$	м/с
3	Кут між напрямом розповсюдження акустичної хвилі та нормаллю відбиваючої (кінцевої опуклої) поверхні <sup>1</sup>	$\theta$	градус
4	Радіус УЗ випромінювача	$a$	мм
5	Густина рідини (дистильована вода)	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>
6	Відстань між вершиною конуса мішені та площиною випромінювача <sup>2</sup>	$d$	мм
7	Температура	$t$	°С
8	Радіус мішені	$b$	мм
9	Нецентрованість УЗ променя і мішені, неперпендикулярність	$S_p$	%
10	Сила ваги	$F_n$	г
11	Напруга на електроакустичному перетворювачі	$U_{\text{ЕАП}}$	В
12	Частотно-залежний коефіцієнт поглинання у воді <sup>2</sup>	$\alpha$	1/м
13	Частотно-залежний коефіцієнт відбивання матеріалу мішені <sup>1</sup>	$\beta$	б/р
14	Частотно-залежний коефіцієнт поглинання матеріалу мішені <sup>2</sup>	$\gamma$	б/р

<sup>1</sup> Тільки для випадку відбиваючої мішені

<sup>2</sup> Тільки для діапазону частот вище 5 МГц

Ресурси, необхідні на створення еталона, не перевищують виділений ліміт.

**д) прийняття рішення щодо напрямку подальшої роботи над створенням еталона**

Приймаються рішення щодо підвищення точності так, щоб задовольнити вимоги ГЗ у всьому діапазоні частот та потужностей і виконують наступну ітерацію.

**3. Третя ітерація**

**а) аналізування бюджету невизначеності та пошук шляхів зменшення невизначеності вхідних величин**

Домінуючими складовими є середньоквадратичне відхилення (СКВ) випадкової похибки та невизначеність у вимірюванні напруги на вході ЕАП (рис. 5). Для подальшого зменшення випадкової складової похибки необхідно вимірювальну частину еталона обладнати захисним кожухом; еталонну кімнату надійніше захистити від дії таких впливових факторів, як шум і вібрація, рух повітря, зміни параметрів довкілля; вимірювальні канали еталона захистити від електромагнітних перешкод та перехресних наводок тощо. Алгоритм управління процесом вимірювання та оброблення вимірювальної інформації необхідно побудувати так, щоб максимально зменшити випадкову складову похибки, наприклад за рахунок адаптивного способу набору числа спостережень при вимірюванні тощо. Для зменшення внеску похибки вимірювання напруги необхідно вибрати вольтметр з вищими характеристиками точності.

**б) удосконалення фізичної моделі**

На третій ітерації у структурній схемі еталона передбачено вдосконалення програмного забезпечення та ефективніша система захисту від зовнішніх впливів, які за експертними оцінками здатні зменшити випадкову складову похибки до 2%. Крім того було включено вольтметр з похибкою не більше 2%, а також осцилограф і частотомір для визначення та контролю параметрів сигналу на вході УЗ випромінювача та точний барометр, термометр, гігрометр — для вимірювання параметрів довкілля (рис. 6).

**в) уточнення математичної моделі**

Ключові звірення національних еталонів одиниці УЗ потужності [7], вперше проведені під контролем Міжнародного комітету мір та вагів, показали, що для еталонів вищого рангу важливіше відтворювати не одиницю потужності, а електроакустичну провідність ЕАП. Електроакустична провідність випромінювача  $G$  — частка від ділення вихідної УЗ потужності  $P_{\text{вих}}$  на квадрат діючого значення напруги  $U_n$  на вході ЕАП, тобто:

$$G = \frac{P_{\text{вих}}}{U_n^2} \quad (7)$$

Тому адекватна модельна функція, таким чином, на третій ітерації включала рівняння (3), (4), (5) і (7) залежно від піддіапазону частот і типу мішені.

**г) порядок оцінювання невизначеності удосконаленням методом PUMA**

Порядок оцінювання невизначеності аналогічний порядку, поданому на другій ітерації.



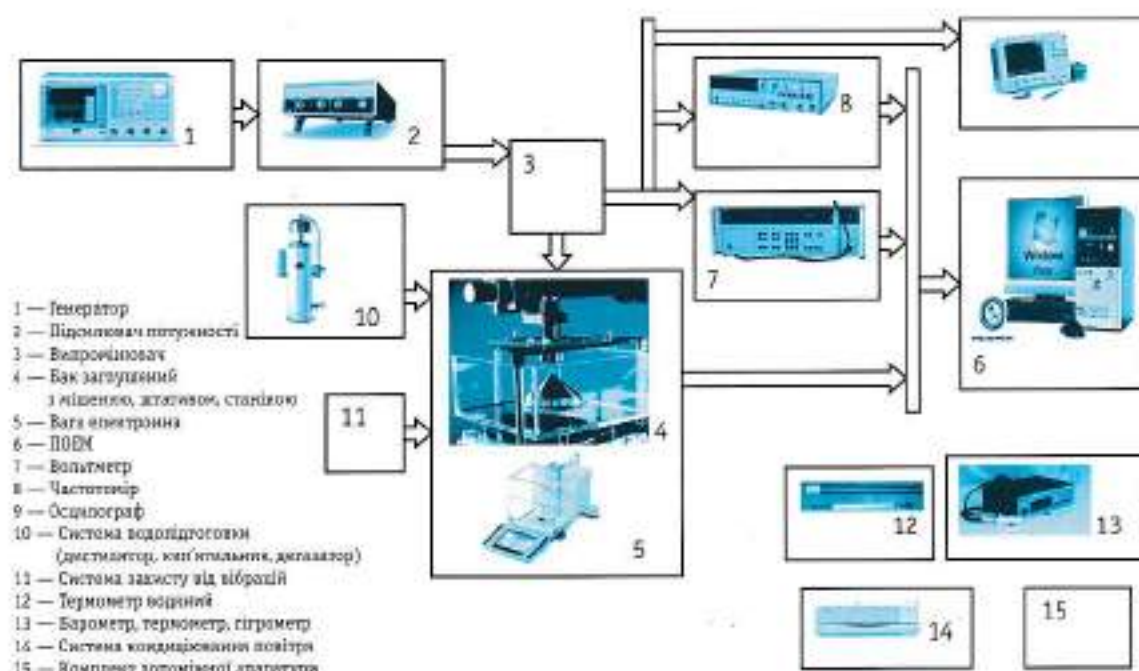


Рис. 6. Ілюстрована структурно-функціональна схема вторинного еталона одиниці потужності У3. Третя ітерація

На третій ітерації розширена невизначеність не перевищила 10% (рис. 7), що задовольняє вимоги ТЗ. Загальні витрати на створення такого еталона — у межах передбаченого ліміту.

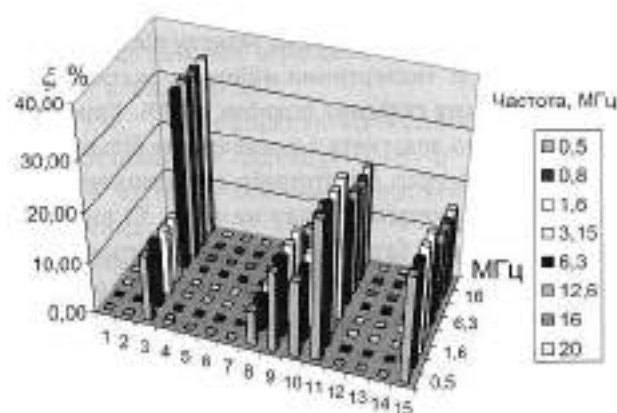


Рис. 7. Гістограма долей вкладів ξ джерел невизначеності залежно від частоти при потужності 5 нВт. Третя ітерація: розширена невизначеність у вимірюванні ( $k=2$ )  $U=10\%$ .

Слід відзначити, що при зниженні домінуючих джерел невизначеності, більшу вагу, більшу долю вкладу набувають і стають домінуючими інші джерела невизначеності, наприклад допуск на кут мішені та неточність позиціонування ЕАП. Ці нові домінуючі джерела необхідно контролювати. Тому конструкція вимірювача потужності еталона повинна забезпечувати необхідну точність позиціонування УЗ випромінювача і мішені (неспіввідношення не більше

$\pm 3$  мм і  $\pm 3^\circ$ ), точність виготовлення мішені (допуск на кут конічної мішені не більше  $\pm 1^\circ$ ) та задану чистоту відбиваючої поверхні.

**д) прийняття рішення**

Відповідно до зазначеного вище вторинного еталона одиниці потужності У3 у водному середовищі може бути створено за структурно-функціональною схемою (рис. 6).

При розробленні конструкції еталона, програмного забезпечення та обладнанні приміщення для його розташування необхідно реалізувати перелічені заходи.

**ВИСНОВКИ**

Запропоновано адаптивну технологію побудови еталона одиниці потужності У3 у водному середовищі, яка передбачає розроблення, уточнення та удосконалення фізичної та математичної моделі еталона, а також оцінку невизначеності удосконаленим методом PUMA. Технологія забезпечує створення еталона одиниці потужності У3 у водному середовищі із заданими високими характеристиками точності за умови обмежених ресурсів.

Удосконалений метод PUMA передбачає розрахунок невизначеності методом числового диференціювання і/або методом Монте-Карло при поступовому переході від «black box» на першій ітерації до розрахунку на підставі адекватної математичної моделі на останній. Це дає можливість поступово нарощувати точність оцінювання невизначеності та виключити її складову, яка пов'язана з лінеаризацією модельної функції, отримати оцінку розширеної не-



визначеності у вимірюванні, особливо у випадку, коли розподіл густини ймовірності вихідної величини не підпорядковується нормальному закону. Метод, вперше застосований нами для обґрунтування

схемо-технічних і конструкторських рішень, є ефективним інструментом для управління невизначеністю у вимірюванні на перших і подальших стадіях створення еталонів одиниць вимірюваних величин. ■

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий С., Чалий В., Ільницька Т. Метод та інформаційна технологія створення еталонів одиниць вимірювання в умовах обмежених ресурсів // Стандартизація, сертифікація, якість. — 2009. — № 2. — С. 34—38.
2. IEC 61161:1998. Ultrasonic power measurement in liquids in the frequency range 0.5 MHz to 25 MHz (Вимірювання ультразвукової потужності у рідких у діапазоні частот від 0,5 Гц до 25 МГц).
3. Паракуда В. В., Колпак Б. Д., Чалий В. П., Ільницька Т. М. Применение метода РИМА при построении эталона единицы мощности ультразвука // Системы обработки информации. — 2008. — Вып. 84 (71). — С. 66—70.
4. Beissner K. Acoustic radiation pressure in the near field. *J. Sound Vib.* 93 (4). — 1984. — P. 537—548. (Байсснер К. Акустичний радіаційний тиск в ближньому полі. *J. Sound Vib.* 93 (4). — 1984. — С. 537—548).
5. Христо Радев. Менеджмент неопределенности // Тезисы лекций школы-семинара «Обработка результатов измерений и оценивание неопределенности при выполнении метрологических работ». — Харьков. — 2007. — С. 53—97.
6. Чалий В. П., Паракуда В. В., Костеров А. А., Гайдук Н. В. Оценивание неопределенности первичного акустического эталона числовыми методами // Тезисы докладов на международном научно-техническом семинаре «Математические методы при обеспечении качества и взаимного признания результатов измерений». — Санкт-Петербург: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 2004. — С. 84—87.
7. Report on the CIPM key comparison CCAUV.U-K1 (ultrasonic power). Final Report. — October, 2002. (Звіт про ключові зйорення Міжнародного Комітету з мір та вагів CCAUV.U-K1 (потужність ультразвуку). Заключний звіт. — Брауншвейг, Німеччина: PTB. — Жовтень, 2002).

### ІНФОРМАЦІЯ ЩОДО XXXV ЗАСІДАННЯ МДР

**Н**а XXXV засіданні МДР за напрямком «Метрологія» було розглянуто такі питання:

- Про реалізацію Протоколу про внесення змін до Угоди про звільнення від сплати мит, податків і видачі спеціальних дозволів за провіз нормативних документів, еталонів, засобів вимірювання і стандартних зразків, що провозяться з метою повірки й метрологічної атестації від 10.02.1995;
- Про хід реалізації Плану розроблення міждержавних нормативних документів з удосконалення обліку та якості взаємопостачаних енергоносіїв на 2007—2009 роки;
- Про хід реалізації «Програми зі створення й застосування міждержавних стандартних зразків складу й властивостей речовин і матеріалів на 2006—2010 роки» і пропозиції щодо їх актуалізації;
- Про актуалізацію Реєстру МСЗ;
- Про хід реалізації «Програми робіт з розроблення атестованих даних щодо фізичних констант та властивостей речовин і матеріалів за кон-

кретними тематичними напрямками на 2007—2012 роки;

- Про хід реалізації Програми «Створення еталонів одиниці довжини нового покоління у діапазоні  $10^{-9}$ — $10^{-4}$  м на 2007—2009 роки»;
- Про хід реалізації та актуалізації «Програми розроблення і перегляду основних нормативних документів ДСВ»;
- Про виконання внутрішньодержавних процедур, необхідних для набрання чинності нової редакції «Угоди про взаємне визнання результатів державних випробувань і затвердження типу, метрологічної атестації, повірки та калібрування засобів вимірювання, а також результатів акредитації лабораторій, що здійснюють випробування, повірку або калібрування засобів вимірювання»;
- Про реалізацію «Протоколу про співробітництво та взаємодію між COOMET і МДР у галузі метрології».

(За матеріалами МДР)