

Міністерство освіти і науки України
Національний університет "Львівська політехніка"

Ільницька Тетяна Мар'янівна



УДК 534:321.9:534.6

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ РОЗРОБЛЕННЯ ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ
ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Паракуда Василь Васильович, директор
Державного підприємства «Науково-дослідний
інститут метрології вимірювальних і управляючих
систем», м. Львів

Офіційні опоненти доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Несжмаков Павло Іванович, генеральний директор
Національного наукового центру «Інститут
метрології», м. Харків

доктор технічних наук, професор
Кошева Лариса Олександрівна, професор кафедри
біокібернетики та аерокосмічної медицини
Національного авіаційного університету, м. Київ

Захист відбудеться «14» квітня 2016 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.21 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 28а, ауд. 713 п'ятого навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, Львів, вул.Професорська,1)

Автореферат розісланий «11» березня 2016 р.

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., доцент*



Т.З. Бубела

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Ультразвук у водному середовищі широко використовують практично у всіх галузях національної економіки, у науці та в соціальній сфері, у тому числі: в хімічній, харчовій та фармацевтичній промисловості для інтенсифікації фізико-механічних процесів. Але найширше ультразвук, зокрема мегагерцового діапазону частот, використовують у медицині – у діагностиці, терапії та хірургії.

Неодмінною умовою ефективного застосування ультразвуку в усіх цих випадках є точні вимірювання його характеристик і надійний контроль вихідних акустичних параметрів апаратури. У медицині, наприклад, за недостатнього рівня ультразвуку не досягається лікувальний ефект, не може бути встановлено достовірний діагноз. За завищеного ж рівня ультразвуку внаслідок нагрівання і/або кавітації руйнуються живі тканини людського організму, що несе небезпеку як пацієнтам так і обслуговуючому медперсоналу.

Акустичні характеристики людського тіла близькі до характеристик дистильованої води, тому, під час калібрування, метрологічної перевірки (повірки) або контролю вихідних параметрів медичної ультразвукової апаратури використовують у якості робочого середовища дистильовану воду з температурою (21 ± 2) °C і вмістом розчиненого кисню не більше 3-5 мг/л.

Тобто для безпечного і ефективного використання ультразвуку вимагається достатня точність та достовірність результатів вимірювання, які б простежувались до еталонів системи одиниць SI та визнавались би на міжнародному рівні. Але донедавна в Україні не існувало системи метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин у мегагерцовому діапазоні частот як такої: не було еталонів і схеми метрологічної перевірки забезпечення простежуваності. Розроблені в гідроакустиці для звукових та інфразвукових частот методи і засоби метрологічного забезпечення не можуть бути використані в діапазоні мегагерцового ультразвуку через його специфічні особливості.

Тому гостро постала потреба створення системи метрологічного забезпечення вимірювання основних параметрів мегагерцового ультразвуку і побудови, у першу чергу, еталонів одиниць вимірювання фізичних величин, які характеризують ультразвукове поле. Одним з основних параметрів акустичного поля, який нормується для всіх видів ультразвукової апаратури, є потужність ультразвукового променя, який генерується ультразвуковим випромінювачем (УЗВ).

Еталон, як унікальний засіб вимірювання, має забезпечувати найвищу точність у країні і не може розроблятися стандартними методами, методами «проб і помилок» подібно до апаратів, машин і механізмів, тим більше за необхідності побудови його в стислі терміни в умовах жорстко обмеженого фінансування. Саме цим продиктована потреба розроблення ефективного методу побудови еталона.

У зв'язку з вищенаведеним, актуальними є вирішення важливого наукового завдання розвитку метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі шляхом розроблення науково-технічних засад створення еталонної бази, у тому числі, розроблення раціонального методу побудови еталонів, створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному

середовищі та розроблення нормативних документів, зокрема схеми метрологічної перевірки та методик.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри інформаційно-вимірювальні технології, а саме, розробленню теоретичних, технологічних та метрологічних основ методів та засобів вимірювання фізичних величин. Дисертаційна робота виконана в межах дослідно-конструкторської роботи «Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі» (шифр теми 06.17.22, № держ. реєстрації 0107U004990, 2007-2010 рр.), яка проводилась у Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем» згідно з Державною програмою розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки (шифр завдання 1.2.10.01). Автор була відповідальним виконавцем, заступником наукового керівника вищевказаної дослідно-конструкторської роботи.

Мета та задачі дослідження. *Метою роботи є обґрунтування та розроблення науково-технічних засад метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі для досягнення єдності та необхідної точності вимірювання в мегагерцовому діапазоні частот в Україні.*

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі були сформульовані наступні задачі:

- проаналізувати сучасний стан метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин в ультразвуковому мегагерцовому діапазоні частот та методи вимірювання потужності ультразвуку;
- проаналізувати проблеми побудови еталонів одиниць вимірювання;
- виконати теоретичні дослідження особливостей поширення високочастотного ультразвуку в водному середовищі;
- розробити математичну модель вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку, випромінюваного у водне середовище;
- розробити новий адаптивний метод для створення еталонів одиниць вимірюваних величин із заданими високими характеристиками точності за умови обмежених ресурсів;
- створити еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі;
- виконати експериментальні дослідження для визначення метрологічних характеристик створеного еталона;
- розробити методику та прикладне програмне забезпечення для оцінювання непевності (невизначеності)¹ вимірювання еталона.

¹ Термін «невизначеність» – буквальный переклад англійського терміну «uncertainty», не повністю відображає зміст цього поняття, не зовсім вдалий з лінгвістичної точки зору і призводить до непорозумінь і парадоксів, на що неодноразово наголошувалося на науково-технічних конференціях і у фахових журналах.

Поняття «uncertainty» виражає той загально визнаний факт, що результат вимірювання ніколи не може бути абсолютно точним. У експериментатора завжди залишається сумнів, непевність у одержаному результаті. Міру цієї непевності відображає термін «uncertainty», який українською мовою перекладається як «невизначеність», що спотворює початковий зміст поняття: воно сприймається у такому разі як щось не визначене, «туманне», не пізнаване і не зрозуміле. Парадоксально звучить часто вживане словосполучення «визначити невизначеність».

В інших слов'янських мовах, наприклад, у чеській, польській та ін. використовується термін «непевність».

Вважаємо, що термін «непевність» точніше відображає поняття, яке в англійській мові позначено терміном «uncertainty». Тому тут і далі по тексту вжито термін «непевність» як синонім до терміну «невизначеність».

Об'єкт дослідження: процес випромінювання ультразвуку та розроблення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.

Предмет дослідження: методи побудови еталонів, методи опрацювання результатів вимірювання і оцінювання непевності вимірювання при відтворенні, зберіганні та передаванні еталоном одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.

Методи дослідження: теоретичні та експериментальні, які базуються на теорії поширення ультразвуку в суцільному середовищі; принципах інформаційних технологій; методах диференціального та інтегрального числення; теорії імовірності та математичної статистики; теорії вимірювання; методах імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено математичну модель відтворення еталоном одиниці потужності ультразвуку, яка враховує конструктивні параметри еталона, умови його експлуатації, що дозволило підвищити точність результатів вимірювання.

2. Удосконалено методику мінімізації непевності шляхом використання методів імітаційного моделювання та числового диференціювання замість аналітичного способу оцінювання непевності, що дозволяє застосовувати її у випадку суттєво нелінійної математичної моделі вимірювання.

3. Вперше застосовано удосконалену методику мінімізації непевності для еталона одиниці потужності ультразвуку на початковій стадії його розроблення, що дозволило визначити структуру вимірювальних каналів еталона для заданих значень апріорної непевності.

4. Вперше розроблено і застосовано адаптивний метод побудови еталонів одиниць вимірюваних величин із заданими характеристиками точності в умовах обмежених ресурсів, що забезпечує оптимальність прийняття схемо-технічних та конструкторських рішень в процесі створення еталона, його програмного забезпечення, формування вимог до конструкції еталона та до приміщення, в якому його встановлюють.

5. Набуло подальшого розвитку застосування методу Монте-Карло для оцінювання непевності вимірювання при відтворенні одиниць фізичних величин еталонами, що дозволило зменшити трудомісткість оцінювання непевності вимірювання створюваного еталона та оцінити внесок непевності кожної вхідної величини у сумарну стандарту непевність вихідної потужності ультразвуку.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблено основи метрологічного забезпечення вимірювання акустичної потужності у водному середовищі в мегагерцовому діапазоні частот:

- розроблено універсальну прикладну програму для оцінювання непевності вимірювання при відтворенні еталоном одиниці потужності ультразвуку методом Монте-Карло;

- створено та введено в дію еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі ВЕТУ 10-169-01-11;

- розроблено і затверджено повірочну схему для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі ЛПУ 10-01-2011 (наказ Держспоживстандарту України від 20 червня 2011 р. № 227, м. Київ);

- розроблено та впроваджено: методику атестації еталона ДШВК 407259.001 МА «Вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. Методика атестації» (ДП НДІ «Система», м. Львів); методику калібрування ультразвукових випромінювачів на еталоні ДШВК 407259.001 МА1 «Еталонні ультразвукові випромінювачі. Методика калібрування» (ДП НДІ «Система», м. Львів); методику перевірки вимірювачів потужності ультразвуку ДШВК 407259.001 МА2 «Вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі ВЕТУ 10-169-01-11. Методика перевірки вимірювача потужності ультразвуку» (ДП НДІ «Система», м. Львів).

Отримані результати можуть бути застосовані як частина навчального курсу для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» у дисциплінах «Конструювання та технології виробництва засобів вимірювання», «Еталони одиниць фізичних величин».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, чисельні та експериментальні результати, що викладені у дисертації та авторефераті, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: аналіз стану та рівня забезпечення єдності вимірювань акустичних величин в ультразвуковому діапазоні частот в Україні та за кордоном [1]; застосування методики мінімізації непевності (методу PUMA) та розрахунок бюджету непевності [2]; розроблення адаптивного методу створення еталонів одиниць вимірюваних величин [3, 11]; оцінювання непевності, безпосередня участь в аналізі і узагальненні результатів, виборі основних параметрів та схемо-технічних рішень в процесі створення еталона [4, 12]; безпосередня участь у виконанні експериментів, аналізі та узагальненні результатів, оцінюванні непевності, розробленні математичної моделі процесу випромінювання акустичної потужності [5]; удосконалення математичної моделі вимірювання, застосування методу Монте-Карло, розроблення програмного забезпечення, виконання експериментальних досліджень та математичних обчислень [6-8, 14, 15]; безпосередня участь у розробленні схеми метрологічної перевірки [7]; узагальнення підходів на прикладі системи метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку [8, 9, 16].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення роботи були представлені та обговорювались на: V міжнародному науково-технічному семінарі «Неопределенность измерения: научные, прикладные и методические аспекты» (UM-2008) (Україна, Судак, 2008); науково-технічній конференції до 40-річчя створення ДП НДІ «Система», (Україна, Львів, 2008); III Міжнародному конкурсі «Лучший молодой метролог КОOMET-2009» (Білорусь, Мінськ, 2009); IV Міжнародному конкурсі «Лучший молодой метролог КОOMET-2011» (Росія, Москва, 2011); Міжнародній науково-технічній конференції «Система-2013» «Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань» (Україна, Львів, 2013); IX міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» («Метрологія-2014») (Україна, Харків, 2014).

Публікації результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертаційної роботи викладено у 16 публікаціях, у тому числі 7 статтях у фахових виданнях України, 1 у виданні України та 1 одноосібній статті у закордонному

періодичному виданні, що належать до наукометричної бази, 7 публікаціях у науково-технічних журналах та збірках праць науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 8 додатків, містить 118 сторінок основного тексту, 32 рисунки, 14 таблиць та список використаних джерел зі 122 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, темами та планами, сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет досліджень, наведено методи виконання досліджень, описано наукову новизну та практичне значення отриманих у дисертації результатів дослідження, вказано особистий внесок здобувача, наведено дані про впровадження результатів роботи, їх апробацію та публікації, представлено структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин в ультразвуковому мегагерцовому діапазоні частот в Україні та за кордоном, методи вимірювання потужності ультразвуку. Розглянуті проблеми побудови еталонів одиниць вимірювання.

Аналіз показав, що за кордоном діють близько 20 міжнародних стандартів, які регламентують методи калібрування гідрофонів та визначення характеристик ультразвукових полів частотою до 40 МГц за допомогою гідрофонів, вимірювання ультразвукової потужності в діапазоні частот від 0,5 МГц до 25 МГц, а також регламентують параметри медичної ультразвукової апаратури та всі аспекти їх метрологічного забезпечення. Функціонують первинні і робочі еталони одиниці потужності ультразвуку, одиниці звукового тиску і швидкості ультразвуку у водному середовищі, діє розгалужена метрологічна інфраструктура.

В Україні метрологічне забезпечення вимірювання акустичних величин у мегагерцовому діапазоні частот у водному середовищі донедавна знаходилося в зародковому стані: відсутні первинні еталони, державні повірочні схеми передавання розміру одиниць фізичних величин, які характеризують ультразвук (не забезпечувалась простежуваність результатів вимірювання), не розроблений достатній комплект нормативно-технічних документів, не налагоджене на належному рівні функціонування метрологічної інфраструктури.

Тому актуальним є розроблення науково-технічних засад метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі.

Вимірювання потужності ультразвуку здійснюють використовуючи різноманітні фізичні ефекти, які мають місце при проходженні ультразвукового променя через водне середовище.

На основі аналізу літературних джерел визначено основні недоліки відомих методів вимірювання потужності ультразвуку, визнано прийнятним метод балансу радіаційної сили з використанням прецизійних електронних ваг.

Сформульовано напрям досліджень та завдання, які необхідно вирішити при побудові еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі в умовах обмежених ресурсів.

У другому розділі викладені особливості процесу випромінювання ультразвуку та поширення його у водному середовищі, подано основні рівняння, які

описують акустичний радіаційний тиск, проведено теоретичні дослідження та уточнено математичну модель вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку, випромінюваного у водне середовище, подано математичну модель процесу випромінювання акустичної потужності УзВ.

Наявність радіаційного тиску ультразвуку було вперше теоретично встановлено Дж.У. Релеєм (тиск Релея). Радіаційний тиск, що створюється обмеженою по фронту плоскою хвилею, вираховував в одновірному наближенні за деяких припущень П. Ланжевена (тиск Ланжевена). Тиск Ланжевена дорівнює усередненій у часі та просторі подвоєній густині кінетичної енергії, яка пропорційна густині повної енергії звукової хвилі, а також інтенсивності, поділеній на швидкість звуку. Якщо тверда перешкода не повністю відбиває звук, то тиск Ланжевена p на неї дорівнює:

$$p = (1 + R^2)E, \quad (1)$$

де R – коефіцієнт відбиття за тиском; E – середнє за часом значення густини повної енергії в падаючій хвилі.

Проте у реальних звукових полях рівність вказаних вище величин – густини кінетичної і потенціальної енергії та інтенсивності, поділеної на швидкість звуку, порушується. Виникає взаємодія хвиль. Задача визначення радіаційного тиску надзвичайно ускладнюється. Її розв'язок на сьогодні ще не знайдено через непереборні математичні труднощі. Відомі лише частинні розв'язки для окремих випадків за ряду спрощуючих припущень як до формулювання задачі, так і до крайових умов. Зокрема, припускають, що звукова хвиля плоска і гармонійна, і падає на перешкоду нормально, відсутня дивергенція та дифракція на перешкоді, рідина не в'язка, поверхня перешкоди (мішені) плоска, відбиття (або поглинання) звуку мішенню ідеальне, вібрація активної поверхні ультразвукового випромінювача гармонійна та інше. За таких припущень і отримано відношення потужності W ультразвукового випромінювання до радіаційної сили F , що діє на плоску поглинаючу мішень, а саме: $W/F = c$, де c – швидкість звуку у воді, яке можна розглядати лише як перше, досить грубе наближення.

К. Бейснер у своїх роботах теоретично розглянув модель взаємодії ультразвукового променя з мішенню адекватнішу до тієї, що практично реалізують у методі балансу радіаційної сили. Показав, що співвідношення між випромінюваною ультразвуковою потужністю W і акустичною радіаційною силою F не є сталою величиною, а щонайменше є функцією параметра (ka) :

$$f(ka) = \left[1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka) \right] / \left[1 - J_1(ka)/ka \right], \quad (2)$$

де J_n - функція Бесселя 1-го роду порядку n ; a – ефективний радіус активного елемента УзВ; k – хвильове число.

У міжнародному стандарті ІЕС 61161 співвідношення, яке зв'язує значення радіаційної сили F , що діє на мішень, із значенням вихідної акустичної потужності W ультразвукового випромінювача подано у вигляді:

для ідеальної абсорбуючої мішені:

$$W = c \cdot F, \quad (3)$$

для ідеально відбиваючої мішені:

$$W = \frac{c \cdot F}{2 \cdot \cos^2 \vartheta}, \quad (4)$$

де c – швидкість звуку у воді; ϑ – кут між напрямком розповсюдження вихідної хвилі і нормаллю відбиваючої (конічної) поверхні.

На практиці використовують мішені, що мають акустичні властивості, які максимально наближені до ідеально абсорбуючих чи ідеально відбиваючих. Відбиваючі мішені бувають опуклого типу з половиною кута при вершині 45° або увігнутого типу з половина кута при вершині конуса в межах $60^\circ \div 65^\circ$. Абсорбуючі мішені, як правило, – це круглі диски з пружного гумового матеріалу з клинами або без них. Для збільшення поглинаючої здатності матеріал повинен містити неоднорідності.

Для розроблення оптимальної конструкції відбиваючої мішені необхідно було провести додаткові теоретичні та експериментальні дослідження, у той час, коли для поглинаючих мішеней у Великобританії у Національній фізичній лабораторії розроблено спеціальний матеріал. Тому у подальших дослідженнях використовували абсорбуючу мішень.

Зупинившись на варіанті з абсорбуючою мішенню, врахувавши, що радіаційна сила F , що діє на мішень, еквівалентна масі m , вимірній за допомогою ваги; коригувальний коефіцієнт вимірювання електричної напруги на вході УзВ; поправки на зміщення резонансної частоти, на відхилення температури від опорного значення, на недосконалість мішені та ємності; методичну поправку; взявши до уваги формулу (2) та вимоги встановлені у міжнародному стандарті ІЕС 61161, було уточнено формулу (3) математичної моделі вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку, випромінюваного у водне середовище:

$$W = c \cdot m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka}\right) \left(1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka)\right)^{-1} \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M); \quad (5)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \lambda = \frac{c}{f}; \quad (6)$$

$$\Pi_T = \alpha \cdot \Delta T; \quad (7)$$

$$\Pi_R = \begin{cases} \pm [\beta + \gamma(\mathcal{F} - \mathcal{F}_0)] & \text{якщо } \mathcal{F} > \mathcal{F}_0; \\ \pm \beta, & \text{якщо } \mathcal{F} \leq \mathcal{F}_0; \end{cases} \quad (8)$$

де W – потужність випромінюваного ультразвуку; c – швидкість звуку у воді; m – маса (покази ваги в одиницях маси), яка еквівалентна радіаційній силі, що діє на мішень; g – прискорення земного тяжіння; V_0, V – електрична напруга на вході УзВ, відповідно, опорна та актуальна; Π_R, Π_T, Π_H – поправки відповідно: на зміщення резонансної частоти, на відхилення температури від опорного значення, на недосконалість мішені та вимірювальної ємності; Π_M – методична поправка; λ – довжина акустичної хвилі; f – частота збуджуючого сигналу; ΔT – відхилення температури від опорного значення; \mathcal{F} – відносне зміщення резонансної частоти; α, β, γ – сталі: $\beta = 0,5 \%$ і $\gamma = 7,3$ – для п'єзокерамічних УзВ і $\beta = 0,05 \%$ і $\gamma = 80$ – для монокристалічних; $\alpha = \pm 0,2 \%$.

Поправки з відповідними оцінками їх точності взято із літературних джерел, міжнародних стандартів, експериментальних даних різних авторів та отримано безпосередньо в процесі експериментальних досліджень еталона.

У третьому розділі дисертаційної роботи удосконалено методику мінімізації непевності, представлено розроблений адаптивний метод створення еталонів

одиниць вимірюваних величин із заданими високими характеристиками точності в умовах обмежених ресурсів; з використанням адаптивного методу визначено оптимальний варіант структурно-функціональної схеми еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.

На сьогодні еталони одиниць вимірювання розробляють аналогічно до розроблення інших приладів, машин і механізмів. Використовують емпіричні, суб'єктивні методи на основі досвіду та інтуїції розробника (методи «проб і помилок»). Схемо-технічні та конструкторські рішення приймають на основі евристичного підходу. Специфічні особливості еталонів, як унікальних вимірювальних інформаційних систем, враховуються при цьому не достатньо.

Такий підхід до створення еталонів доволі трудомісткий і не може дати оптимального рішення. На створення еталона витрачаються значні ресурси, але задані високі характеристики точності при цьому можуть і не досягатися.

Тому розроблено ітераційний метод поступового уточнення фізичної та математичної моделі в міру накопичення інформації у процесі проектування еталона, що базується на результатах теоретичних та експериментальних досліджень. Для оцінювання непевності застосовано удосконалену методику мінімізації непевності – метод PUMA (Procedure for Uncertainty Management). Детальний опис реалізації методу PUMA для оцінювання непевності при вимірюванні геометричних параметрів продукції подано в ISO/TS 14253-2 та ДСТУ ISO/TS 14253-2.

Для вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі метод PUMA був вперше застосований на початковій стадії його створення для обґрунтування структури і складу вимірювальних каналів в умовах апріорної непевності, коли конструкція вторинного еталона тільки розробляється і немає достатніх даних та результатів експериментальних досліджень для оцінки очікуваних характеристик точності. Модельне рівняння в цьому випадку суттєво спрощене і тому можна було використати аналітичний спосіб оцінки непевності включно з процедурою чорного ящика. Оскільки, у процесі створення еталона враховують все більше факторів і їх функціональних зв'язків, що впливають на кінцевий результат, модельне рівняння уточнюється і ускладнюється, стає суттєво нелінійним, тому для подальших розрахунків удосконалено метод PUMA.

Удосконалений метод PUMA передбачає поєднання методів чорного ящика («black box») і прозорого ящика («transparent box») запису модельного рівняння та методів числового диференціювання при розрахунку непевності і/або методів імітаційного моделювання (методу Монте-Карло) для обчислення сумарної стандартної непевності та розширеної непевності, якщо модельне рівняння суттєво нелінійне або проведення вимірювань вимагає багато часу.

Запропонований адаптивний метод (рисунок 1) реалізують у кілька ітерацій.

При першій ітерації виконують наступні кроки:

а) аналізують апріорну інформацію, отриману за результатами попередніх науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, досвіду роботи національних метрологічних інститутів розвинених країн, вітчизняних і міжнародних нормативних документів, каталогів фірм, що випускають вимірювальні прилади, літературних джерел та інше;

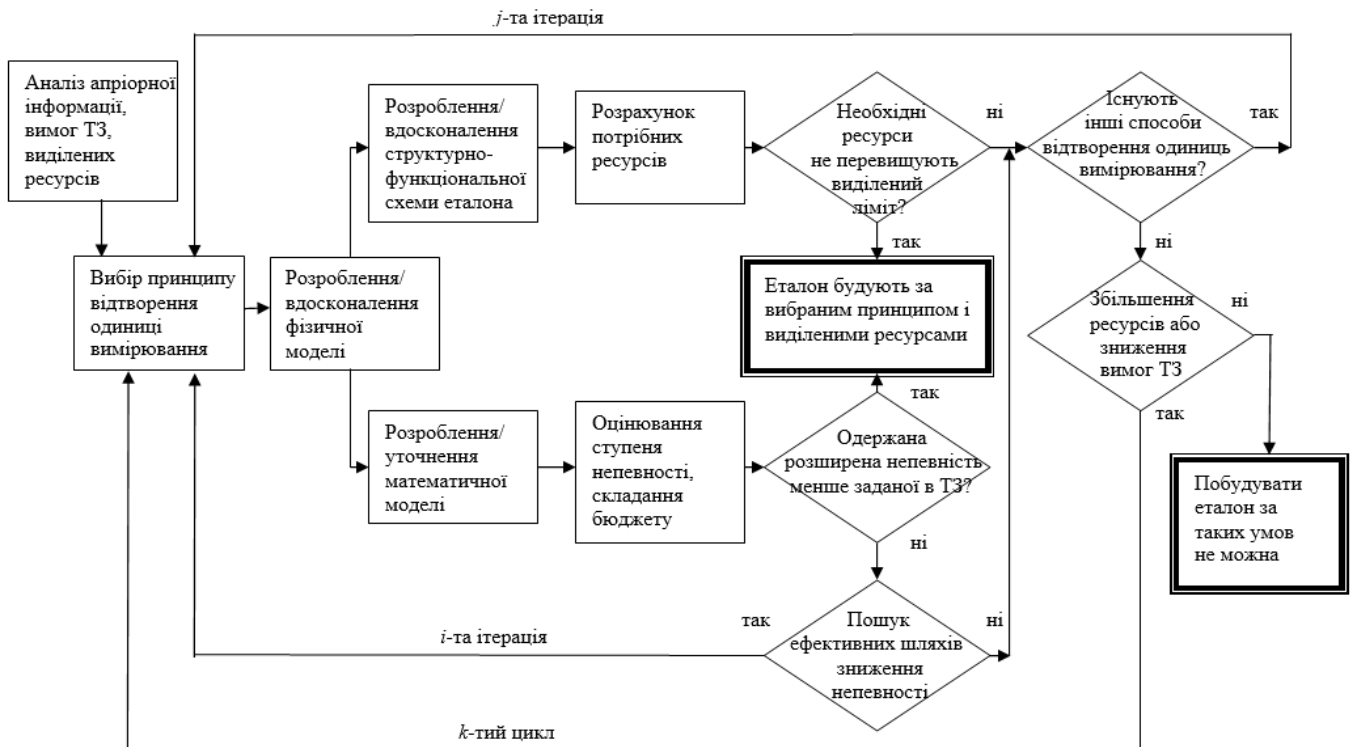


Рисунок 1 – Структурно-функціональна схема адаптивного методу створення еталонів одиниць вимірювання за обмежених ресурсів

б) вибирають принцип відтворення одиниці вимірювання та розробляють на основі аналізу фізичну модель вимірювання.

в) розробляють на підставі фізичної моделі першого наближення математичну модель вимірювання (модельне рівняння). Для побудови модельного рівняння використовують поєднання методів чорного ящика і прозорого ящика;

г) оцінюють ступінь непевності у вимірюванні удосконаленим методом PUMA. Складають у формі таблиці бюджет непевності, кінцевим результатом якого є розширена непевність у вимірюванні (за попередньо вибраною структурною схемою еталона) та частки внесків кожного з її джерел у сумарну непевність вихідної величини. Крім того для наочності бюджет непевності подають у вигляді гістограми часток внесків джерел непевності у сумарну непевність.

Паралельно оцінюють на основі структурно-функціональної схеми затрати ресурсів.

д) порівнюють одержані результати оцінки розширеної непевності із заданою в технічному завданні (ТЗ) та перевіряють ресурси, необхідні для реалізації такого варіанту еталона, на відповідність ліміту. Приймають рішення щодо напрямку подальшої роботи над створенням еталона і підвищенням характеристик точності майбутнього еталона.

Перша ітерація наближена і дає перше уявлення про основні джерела непевності.

У другій ітерації та, за необхідності, третій і наступних ітераціях виконують наступні кроки:

а) проводять аналіз результатів розрахунків, виконаних при першій ітерації, встановлюють джерела, які вносять найбільший внесок у розширену непевність

вихідної (вимірюваної) величини, шукають технічні рішення для їх зменшення (у разі необхідності);

б) удосконалюють фізичну модель вимірювання при відтворенні, зберіганні та передаванні одиниці вимірювання.

Розробляють удосконалений варіант структурно-функціональної схеми еталона;

в) уточнюють математичну модель, враховуючи, за можливості, і ті інформативні параметри та впливові величини, які не вдавалося врахувати в явному вигляді при першій ітерації;

г) оцінюють ступінь непевності у вимірюванні вдосконаленим методом РУМА. Складають бюджет непевності у формі таблиці та подають у вигляді гістограми часток внесків джерел непевності у сумарну непевність.

Паралельно розробляють структурно-функціональну схему еталона та оцінюють потрібні ресурси.

д) порівнюють одержані результати оцінки розширеної непевності із заданою в ТЗ. Ресурси, необхідні для реалізації такого варіанту еталона, перевіряють на відповідність ліміту. Приймають рішення щодо напрямку подальшої роботи над створенням еталона.

Характерно, що при зниженні домінуючих джерел непевності після чергової ітерації за рахунок раціональніших схемо-технічних і конструктивних рішень на наступних ітераціях більшу вагу, більшу частку внеску набувають і стають домінуючими інші джерела непевності. Тому найефективнішими будуть заходи, направлені на зменшення впливу домінуючих джерел, які виявлені при попередній ітерації. Запропонований адаптивний метод дає можливість знаходити оптимальні рішення у таких ситуаціях.

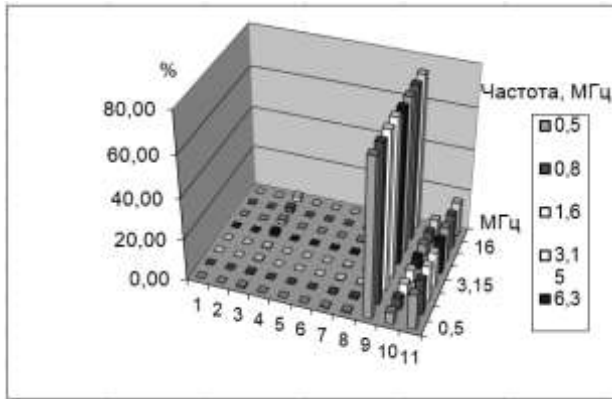
Якщо при другій, третій і на наступних ітераціях не вдається досягти заданих характеристик точності, тобто сучасний рівень розвитку науки і техніки не дозволяє виконати вимоги, поставлені у ТЗ, або вимагає дуже великих матеріальних затрат, то розглядають інші способи відтворення одиниці вимірювання, ставлять питання про збільшення ресурсів на створення еталона або зниження вимог ТЗ щодо його точності.

Розроблення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі проводилося відповідно до запропонованого адаптивного методу.

При першій ітерації розглядали спрощений варіант структури еталона, який включав лише генератор, підсилювач потужності, ультразвуковий випромінювач, бак з мішенню, вагу III класу і систему водопідготування. Обчислення виконували на основі спрощеної математичної моделі (3), (4) з метою попередньої оцінки розширеної непевності та співставлення її з вимогами ТЗ на створення еталона, а також з метою виявлення домінуючих складових непевності. Розширена непевність при першій ітерації складала приблизно 39 % і виявилася значно більшою за ту, яка задана у ТЗ. Домінуючими складовими були неточність ваги III класу та випадкова складова (рис. 2 а).

Для зменшення розширеної непевності у складі еталона використали вагу підвищеної точності. Для зменшення випадкової складової непевності виявляли її можливі джерела при виборі структурної схеми, розробленні конструкції еталона,

програмного забезпечення та облаштуванні приміщення, де розташовувався еталон, що дозволило знизити випадкову складову похибки вимірювання в два рази.

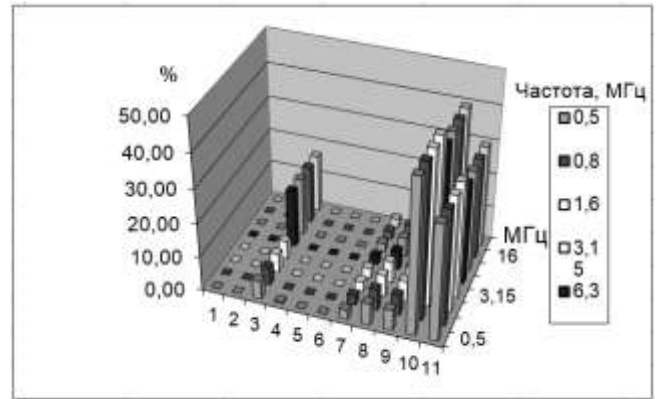


а) перша ітерація

На осі абсцис подані джерела непевності: 3 - кут між напрямом розповсюдження акустичної хвилі і нормаллю відбиваючої (конічної опуклої) поверхні; 7 - радіус мішені; 8 – не центрованість ультразвукового променя і мішені, не перпендикулярність; 9 – маса, яка еквівалентна радіаційній силі; 10 - напруга на електроакустичному перетворювачі; 11 – середньоквадратичний відхил випадкової похибки.

По осі ординат відкладена робоча частота.

Рисунок 2 – Гістограма часток внесків ξ джерел непевності залежно від частоти при потужності 5 мВт.



б) друга ітерація

При другій ітерації, до структурно-функціональної схеми еталона введено вагу 1 класу, систему захисту від акустичних завад і вібрацій, вольтметр для контролю стабільності напруги на вході ультразвукового випромінювача, термометр для контролю зміни температури води. Обчислення виконувались на основі математичної моделі (3), (4) з врахуванням (2). Одержана розширена непевність лише в деяких піддіапазонах вимірювання незначно перевищувала задану у ТЗ. Домінуючими складовими були середньоквадратичний відхил (СКВ) випадкової похибки та непевність у вимірюванні напруги на вході УзВ (рис. 2 б).

Для подальшого зменшення випадкової складової похибки вимірювальну частину еталона обладнали захисним кожухом; приміщення, де розташовувався еталон, додатково захищали від дії таких впливових факторів як шум і вібрація, рух повітря, зміни параметрів довкілля; вимірювальні канали еталона захищали від електромагнітних завад та наведень і т.п. Для зменшення внеску похибки вимірювання напруги вибрали вольтметр з необхідними характеристиками точності.

При третій ітерації у структурній схемі еталона передбачали вдосконалення програмного забезпечення та ефективнішу систему захисту від зовнішніх впливів, використовували вольтметр з граничною допустимою похибкою не більше 2 %, осцилограф для контролю параметрів сигналу на вході УзВ та барометр, термометр, гігрометр – для вимірювання параметрів довкілля (рис. 3). Обчислення виконувались на основі математичної моделі (5)-(8) з врахуванням формули для визначення електроакустичної провідності G :

$$G = \frac{W_{out}}{V_{in}^2}, \quad (9)$$

де W_{out} – вихідна ультразвукова потужність; V_{in} – напруга на вході УзВ.

Результат вимірювання потужності ультразвуку залежить від стабільності характеристик УзВ, зокрема, від зміни температури чутливого елемента під дією збуджуючого сигналу. Розроблена комп'ютерна програма для регресійного аналізу результату вимірювання та наступної екстраполяції його назад до моменту подання на УзВ збуджуючого сигналу, коли температури чутливого елемента УзВ і води в околі нього контрольована.

Потужність випромінюваного ультразвуку визначали за формулами математичної моделі (5)-(8) з врахуванням (9). За результатами вимірювання визначали робочий діапазон частот еталонної устави і діапазон відтворених потужностей випромінюваного ультразвуку та оцінювали характеристики точності: систематичну і випадкову похибки та розширену непевність у вимірюванні під час відтворення одиниці потужності ультразвуку.

Непевність у вимірюванні оцінювали аналітичним методом та методом Монте-Карло (МСМ).

Суть МСМ щодо дослідження непевності вимірювання полягала в наступному: кожен раз при обчисленні функції вимірювання в рівнянні математичної моделі підставлялися генеровані випадкові значення вхідних величин, кожна з яких варіює навколо свого номінального значення в межах інтервалу непевності відповідно до закону розподілу густини імовірності.

При кожному комп'ютерному моделюванні вимірювання проводилось не менше 100 000 спостережень. Отриманий масив даних опрацьовували статистично.

Для імітаційного моделювання процесу вимірювання на еталонній уставі одиниці потужності ультразвуку по МСМ розроблено прикладну програму. У процесі роботи програми отримані середні значення вимірюваної величини (потужності ультразвуку), СКВ, диференціальний та інтегральний розподіл вихідної величини, коефіцієнт асиметрії та ексцес розподілу.

Оцінку сумарної стандартної непевності обчислювали як експериментальний СКВ. Розширену непевність при заданій довірчій імовірності визначали безпосередньо з інтегрального розподілу ймовірності вихідної величини, без попереднього обчислення ефективного числа ступенів свободи і встановлення коефіцієнта розширення. Коефіцієнт розширення для довірчої імовірності 0,95 розраховано за розширеної непевності.

За результатами досліджень складено бюджет непевності. Приклад бюджету непевності для номінальної потужності сигналу 1 Вт подано в таблиці 1.

Метод Монте-Карло дозволив, також, оцінити внесок непевності кожної вхідної величини в сумарну стандартну непевність вихідної.

Результати експериментальних досліджень показали, що створений еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі забезпечує наступні технічні та метрологічні характеристики:

- робочий діапазон частот становить: від 0,5 МГц до 20 МГц;
- діапазон значень потужності ультразвуку, у якому зберігається, відтворюється та передається одиниця вимірювання, становить: від 0,005 Вт до 1 Вт (залежно від частоти).

У 2011 році еталон ВЕТУ вдосконалено і розширено верхню межу відтворення потужності з 1 Вт до 4 Вт;

Таблиця 1 – Бюджет непевності, номінальна потужність 1 Вт.

Найменування	Вхідні величини					Вихідні величини	
	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення	Характеристики точності (відхилення)	Моделльний закон розподілу	Внесок, %	Частка внеску, %
Напруга на ультразвуковому випромінювачі	V	В	3,04	0,06	рівн.	1,16	21,14
Покази ваги	m	мг	71,2	0,76	норм.	2,15	72,30
Частота збуджуючого сигналу	f	МГц	1,877	$1,0 \cdot 10^{-5}$	рівн.	0,12	0,24
Прискорення земного тяжіння	g	м/с ²	9,81	$1,0 \cdot 10^{-3}$	рівн.	0,12	0,24
Ефективний радіус ультразвукового випромінювача	a	мм	12,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	рівн.	0,20	0,63
Швидкість звуку у воді	c	м/с	1493	$1,0 \cdot 10^{-3}$	рівн.	0,00	0,00
Поправка на відхилення температури води від опорного значення	P_T	°C	0	$4,0 \cdot 10^{-3}$	рівн.	0,21	0,71
Методична поправка	P_M	Вт	0	0,02	рівн.	0,60	5,69
Поправка на недосконалість мішені та вимірювальної ємності	P_H	Вт	0	0,01	рівн.	0,40	2,52
Потужність, P, Вт							1,05
Метод Монте-Карло							
Сумарна стандартна непевність, %							2,53
Коефіцієнт розширення при рівні довірчої імовірності 0,95							1,95
Розширена непевність при рівні довірчої імовірності 0,95; U, %							4,93
Аналітичний метод							
Сумарна стандартна непевність, %							2,72
Коефіцієнт розширення при рівні довірчої імовірності 0,95							2,00
Розширена непевність при рівні довірчої імовірності 0,95; U, %							5,44

- границі основної невилученої систематичної похибки Θ_s знаходяться в межах від 2 % до 4 % (залежно від частоти і рівня потужності) за довірчої імовірності $P = 0,99$;

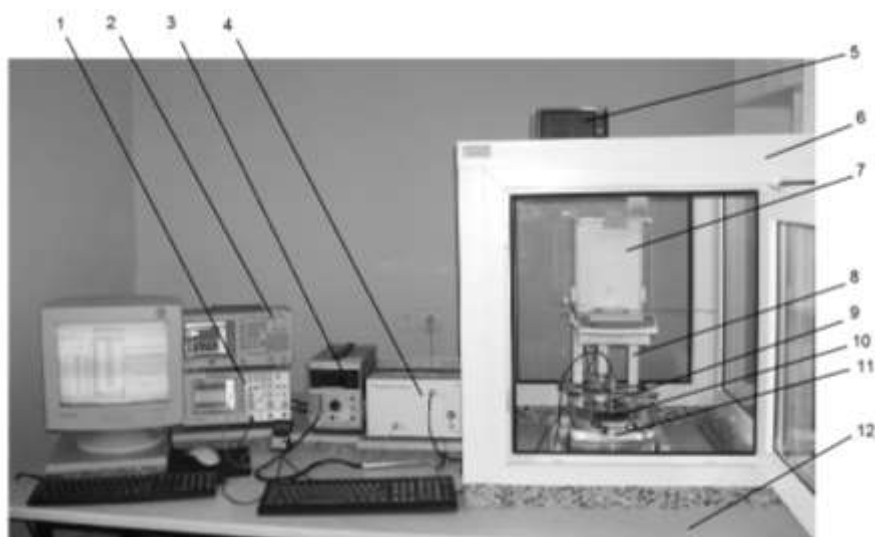
- СВК результату вимірювання S : від 0,2 % до 3 % (залежно від частоти і рівня потужності) за 10 незалежних спостережень;

- розширена непевність (коефіцієнт розширення $k = 2$) U – від 2 % до 7 % (залежно від частоти і рівня потужності), у тому числі: стандартна непевність за типом А – $u_A = (0,2 - 3,1)$ %; стандартна непевність за типом В – $u_B = (0,8 - 1,7)$ %; стандартна сумарна непевність – $u_C = (0,9 - 3,4)$ %.

Розширена непевність національного еталона Росії $U = (5 \div 6)$ %; Німеччини – $U = 3$ %; Канади – $U = (7 \div 10)$ %; Китаю – $U = 5$ %. Тобто вітчизняний еталон не поступається своїм зарубіжним аналогам.

Створений вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі (рис. 4) затверджено та введено в дію у грудні 2010 р. Йому присвоєно реєстраційний номер в Реєстрі державних, первинних і вторинних еталонів: ВЕТУ 10-169-01-11. На сьогодні, еталон ВЕТУ 10-169-01-11 є вихідним для України.

Розроблено і затверджено трирівневу повірочну схема ЛПУ 10-01-11 передавання одиниці потужності ультразвуку (рис. 5). Повірочна схема регламентує методи, засоби вимірювання та характеристики точності на всіх її рівнях включно з метрологічними характеристиками робочих засобів вимірювання і забезпечує таким чином необхідну точність і простежуваність результатів вимірювання до міжнародних еталонів системи одиниць SI.



1 – осцилограф; 2 – генератор; 3 – вольтметр; 4 – підсилювач потужності; 5 – прилад контролю за умовами довкілля; 6 – захисний кожух; 7 – вага; 8 – підставка під ваги; 9 – ультразвуковий випромінювач; 10 – мішень на підвісках; 11 – вимірювальна ємність з дистильованою водою; 12 – робочий стіл із системою захисту від шуму, вібрацій та повітряних потоків

Рисунок 4 – Основні складові вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі

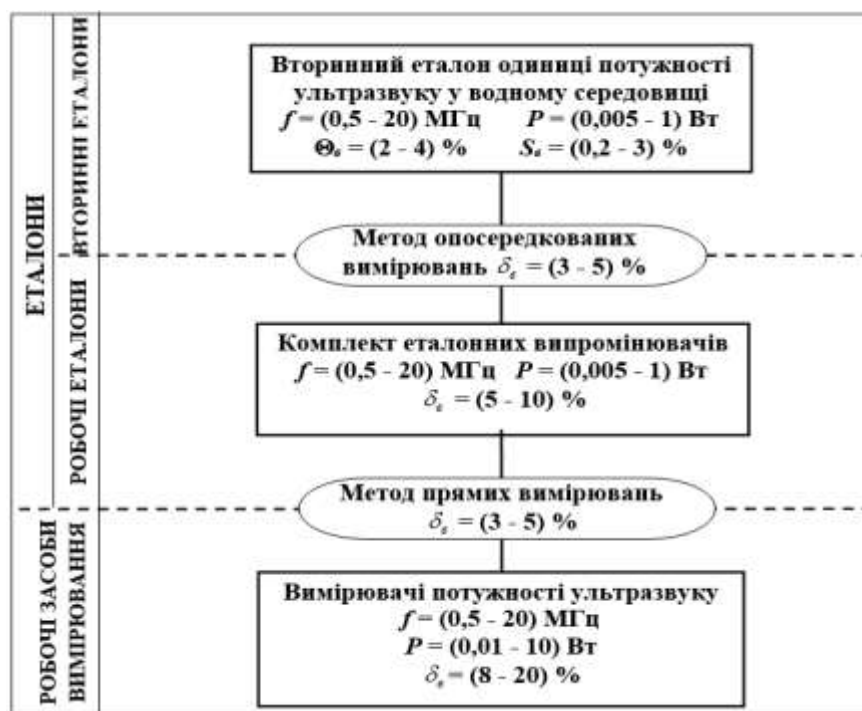


Рисунок 5 – Локальна повірочна схема для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі ЛПУ 10-01-11

У жовтні 2011 року розпочато звірення еталона ВЕТУ 10-169-01-11 з національним еталоном одиниці потужності ультразвуку Росії.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень, з метою забезпечення простежуваності результатів вимірювання потужності ультразвуку у воді робочими засобами вимірювання до вихідного еталона розроблено методику калібрування ультразвукових випромінювачів на ВЕТУ 10-169-01-11.

Розроблено методику перевірки вимірювачів потужності ультразвуку, яка встановлює методи і засоби первинної та періодичної перевірки зазначених вище вимірювачів потужності.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Внаслідок досліджень, присвячених розв'язанню важливої науково-практичної задачі забезпечення єдності та простежуваності вимірювання потужності ультразвуку у воді в мегагерцовому діапазоні частот в Україні, отримано наступні основні наукові та практичні результати:

1. Проаналізовано сучасний стан метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин в ультразвуковому мегагерцовому діапазоні частот в Україні та за кордоном, методи вимірювання потужності ультразвуку, що дало можливість вибрати для реалізації в еталоні одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі метод балансу радіаційного тиску з використанням прецизійної електронної ваги.

2. За результатами аналізу проблем побудови еталонів одиниць вимірювання обґрунтовано необхідність розроблення адаптивного методу побудови еталонів одиниць вимірюваних величин із заданими характеристиками точності в умовах обмежених ресурсів.

3. Проведено теоретичні дослідження особливостей процесу поширення високочастотного ультразвуку у водному середовищі, що дозволило удосконалити математичну модель вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку, випромінюваного у водне середовище.

4. Удосконалено математичну модель відтворення еталонном одиниці потужності ультразвуку, яка враховує конструктивні параметри еталона, умови експлуатації, що дозволило підвищити точність результатів вимірювання в чотири рази.

5. Вперше розроблено і застосовано адаптивний метод побудови еталонів одиниць вимірюваних величин із заданими характеристиками точності в умовах обмежених ресурсів, що забезпечує оптимальність прийняття схемо-технічних та конструкторських рішень в процесі створення еталона, його програмного забезпечення, формування вимог до конструкції еталона та до приміщення, в якому його встановлюють.

6. Удосконалено методику мінімізації непевності шляхом використання методів імітаційного моделювання та числового диференціювання замість аналітичного способу оцінювання непевності, що дозволяє застосовувати його у випадку суттєво нелінійної математичної моделі вимірювання.

7. Вперше застосовано удосконалену методику мінімізації непевності для еталона одиниці потужності ультразвуку на початковій стадії його розроблення, що дозволило визначити структуру вимірювальних каналів еталона для заданих значень апріорної непевності.

8. Набуло подальшого розвитку застосування методу Монте-Карло для оцінювання непевності вимірювання при відтворенні одиниць фізичних величин еталонами, що дозволило зменшити в два рази трудомісткість оцінювання непевності вимірювання створюваного еталона та оцінити внесок непевності кожної вхідної величини у сумарну стандарту непевність вихідної потужності ультразвуку.

9. Створено та введено в дію вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі ВЕТУ 10-169-01-11, який є вихідним для України. За результатами експериментальних досліджень визначено, що в діапазоні

частот від 0,5 МГц до 20 МГц, діапазоні відтворюваних потужностей – від 0,05 Вт до 4 Вт, границі основної невилученої систематичної похибки Θ_{α} знаходиться в межах від 2 % до 4 % ($P=0,99$); середньоквадратичний відхил результату вимірювання S : від 0,2 % до 3 %; розширена непевність ($k=2$) U – від 2 % до 7 %.

10. Розроблено і затверджено повірочну схему для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі ЛПУ 10-01-2011, яка регламентує методи, засоби вимірювання та характеристики точності на всіх її рівнях, і є основою для забезпечення простежуваності результатів вимірювання одиниці потужності ультразвуку до міжнародних еталонів системи одиниць SI.

11 На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та впроваджено методу атестації еталона ВЕТУ 10-169-01-11, методу калібрування ультразвукових випромінювачів на еталоні та перевірки вимірювачів потужності ультразвуку; розроблено універсальну прикладну програму для оцінювання непевності вимірювання еталона методом Монте-Карло.

Отримані характеристики та параметри розроблених еталона та програмних засобів підтверджують коректність наукових положень та адекватність запропонованих методів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

2. Паракуда В.В. Применение метода РУМА при построении эталона единицы мощности ультразвука / В.В. Паракуда, Б.Д. Колпак, В.П. Чалий, Т.М. Ильницкая // Системи обробки інформації. – 2008. – № 4 (71). – С. 66–70.

3. Чалий С. Метод та інформаційна технологія створення еталонів одиниць вимірювання в умовах обмежених ресурсів / С. Чалий, В. Чалий, Т. Ільницька // Стандартизація, сертифікація, якість, – 2009. – № 2 (57). – С. 34–38.

4. Чалий В. Адаптивна технологія побудови еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі / В. Чалий, Т. Ільницька, С. Чалий // Стандартизація, сертифікація, якість, – 2009. – № 3. – С. 37–43.

5. Ільницька Т.М. Дослідження непевності у визначенні основних характеристик еталонного ультразвукового випромінювача / Т.М. Ільницька, В.П. Чалий, А.І. Кузій. // Системи обробки інформації. – 2010. – № 4 (85). – С. 157–162.

6. Ильницкая Т.М. Применение метода Монте-Карло для оценивания неопределенности ультразвукового эталона / Т.М. Ильницкая, В.П. Чалий, А.А. Костеров // Системи обробки інформації. – 2012. – № 1 (99). – С. 108–112.

7. Чалий В. Створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі / В. Чалий, Т. Ільницька // Метрологія та прилади. – 2012. – № 3. – С. 16–25.

8. Чалий В. Єдність і метрологічна простежуваність результатів вимірень потужності ультразвуку / В. Чалий, Т. Ільницька, І. Кізілівський // Метрологія та прилади. – 2014. – № 5. – С. 5–10.

9. Паракуда В.В. Простежуваність результатів вимірювання потужності ультразвуку / В.В. Паракуда, В.П. Чалий, Т.М. Ільницька, І.Г. Кізілівський // Український метрологічний журнал. – 2014. – № 4. – С. 24–28.

10. Ilnytska T. Investigation of metrological characteristics of the measurement standard of ultrasound power unit in water medium / T. Ilnytska // Sustainable development. – 2015. – Vol. 3 (24). – P. 102–107.

11. Чалий С.Ф. Адаптивний метод побудови еталонів одиниць вимірювання / С.Ф. Чалий, В.П. Чалий, Т.М. Ільницька // Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація : матеріали наук.-техн. конф., (30-31 жовт. 2008 р., м. Львів) / ДП НДІ «Система». – Львів, 2008. – С. 172–176.

12. Чалий В.П. Метод побудови еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі із застосуванням інформаційних технологій / В.П. Чалий, Т.М. Ільницька, С.Ф. Чалий // Системи-2008: метрологія, стандартизація, сертифікація : матеріали наук.-техн. конф., (30-31 жовт. 2008 р., м. Львів) / ДП НДІ «Система». – Львів, 2008. – С. 177–184.

13. Ильницкая Т.М. Использование информационной технологии при построении эталона единицы мощности ультразвука в водной среде в условиях ограниченных ресурсов / Т.М. Ильницкая // Лучший молодой метролог КООМЕТ-2009 : доклады III Международного конкурса., (14–15 апр. 2009 г., г. Минск) / БелГИМ. – Минск, 2009. – С. 179–185.

14. Ільницька Т. Результати дослідження метрологічних характеристик еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі / Т. Ільницька, В. Чалий // Система-2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань : тези доповідей Міжнарод. наук.-техн. конф., (23-27 вер. 2013 р., м. Львів). – Львів, 2013. – С. 209–210.

15. Чалый В.П. Создание в Украине материальной базы метрологического обеспечения измерения мощности ультразвука в мегагерцовом (медицинском) диапазоне частот в водной среде / В.П. Чалый, Т.М. Ильницкая, В.В. Паракуда, И.Г. Кизливский // Метрология гидроакустических измерений : материалы Всероссийской научн.-техн. конф., (25-27 сент. 2013 г., п.г.т. Менделеево). Т.1. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. – С. 265–272.

16. Паракуда В.В. Простежуваність результатів вимірювання потужності ультразвуку / В.В. Паракуда, В.П. Чалий, Т.М. Ільницька, І.Г. Кізілівський // Метрологія та вимірювальна техніка («Метрологія-2014») [Електронний ресурс]: наук. праці ІХ міжнар. наук.-техн. конф. (15–16 жовт. 2014 р., м. Харків). – Електрон. дан. – Харків, 2014. – С. 132–135. – 1 CD-ROM. – Назва з етикетки диску.

АНОТАЦІЯ

Ільницька Т.М. Науково-технічні засади розроблення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти та науки України, Львів, 2016.

Дисертація присвячена розробленню науково-технічних засад метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі. Проаналізовано сучасний стан метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин в ультразвуковому мегагерцовому діапазоні частот в Україні та за кордоном, методи вимірювання потужності ультразвуку. Проведено теоретичні

дослідження розповсюдження високочастотного ультразвуку у водному середовищі. Удосконалено математичну модель вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку, випромінюваного у водне середовище. Удосконалено методику мінімізації непевності та вперше застосовано на початковій стадії розроблення еталона одиниці потужності ультразвуку. Розроблено і застосовано новий адаптивний метод побудови еталонів одиниць вимірюваних величин із заданими характеристиками точності в умовах обмежених ресурсів. Проведено експериментальні дослідження для визначення метрологічних характеристик створеного еталона. Застосовано метод Монте-Карло для оцінювання непевності вимірювання еталона та розроблено прикладну програму для його реалізації. Створено та введено в дію еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. Розроблено повірочну схему для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі, методики: метрологічної атестації еталона, калібрування ультразвукових випромінювачів, перевірки вимірювачів потужності ультразвуку.

Ключові слова: ультразвук, потужність ультразвуку, еталон, адаптивний метод, непевність, метод Монте-Карло, методика мінімізації непевності, простежуваність.

ANNOTATION

Ilynska T. Scientific and technical principles of the development of the measurement standard of ultrasound power unit in water medium. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.01.02 – standardization, certification and metrological assurance. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The thesis is devoted to the development of scientific and technological bases of metrological assurance of ultrasound power measurements in water medium. Ultrasound power measurement methods and the current state of metrological assurance of measurement of acoustic variables in the ultrasonic frequency range both in Ukraine and abroad have been analyzed. The theoretical research of propagation of high frequency ultrasound in water medium has been conducted. The mathematical model of measurement during the realization of ultrasound power unit emitted into the water medium has been improved. The Procedure for Uncertainty Management has been improved and applied for the first time and at an early stage of development of the measurement standard of ultrasound power unit. The new adaptive method of construction of the measurement standards of measured variables with specified characteristics of accuracy in conditions of limited resources has been developed and implemented. Experimental research has been conducted to determine the metrological characteristics of established measurement standard. Monte Carlo method for evaluation uncertainty of measurement of the measurement standard has been applied and application program for its implementation has been developed. The measurement standard of ultrasound power unit in water medium has been created and enacted. The verification scheme for measurement of ultrasound power in water medium, the method of meteorological attestation of measurement standard, the method of calibration of ultrasonic transducers, and the method of verification of ultrasonic power meter have been developed.

Key words: ultrasound, ultrasound power, measurement standard, adaptive method, uncertainty, Monte Carlo method, Procedure for Uncertainty Management, traceability

АННОТАЦИЯ

Ильницкая Т.М. Научно-технические основы разработки эталона единицы мощности ультразвука в водной среде. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 – стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. Национальный университет «Львовская политехника» Министерство образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена разработке научно-технических основ метрологического обеспечения измерения мощности ультразвука в водной среде для достижения единства и необходимой точности измерений в мегагерцовом диапазоне частот в Украине. Проведен анализ современного состояния метрологического обеспечения измерения акустических величин в ультразвуковом мегагерцовом диапазоне частот в Украине и за рубежом. Проанализировано методы измерения мощности ультразвука, выбрано для реализации в эталоне единицы мощности ультразвука в водной среде метод баланса радиационной силы с использованием прецизионных электронных весов. Проведены теоретические исследования распространения высокочастотного ультразвука в водной среде. На основании проведенных теоретических исследований, с учетом конструктивных параметров эталона и условия его эксплуатации, усовершенствована математическая модель измерения при воспроизведении единицы мощности ультразвука, излучаемого в водную среду. Усовершенствована методика минимизации неопределенности путем использования методов числового дифференцирования для расчета неопределенности или методов имитационного моделирования (метод Монте-Карло) для расчета суммарной стандартной неопределенности и расширенной неопределенности. Усовершенствованная методика впервые применена на начальной стадии разработки эталона единицы мощности ультразвука, что позволило определить структуру и состав измерительных каналов эталона для заданных значений априорной неопределенности. Разработан и применен новый адаптивный метод построения эталонов единиц измеряемых величин с заданными характеристиками точности в условиях ограниченных ресурсов, который позволяет выбирать оптимальные схмотехнические и конструкторские решения при создании эталона, его программного обеспечения, формировать требования к конструкции эталона и к помещению, в котором его устанавливают. Проведены экспериментальные исследования для определения метрологических характеристик созданного эталона. Для оценки неопределенности измерения при воспроизведении эталоном единицы мощности ультразвука применен метод Монте-Карло и разработана компьютерная программа для его реализации. Создан и введен в действие эталон единицы мощности ультразвука в водной среде. Разработана и утверждена поверочная схема для средств измерений мощности ультразвука в водной среде. Разработаны и внедрены: методика метрологической аттестации эталона единицы мощности ультразвука в водной среде, методика калибровки ультразвуковых излучателей, методика поверки измерителей мощности ультразвука.

Ключевые слова: ультразвук, мощность ультразвука, эталон, адаптивный метод, неопределенность, метод Монте-Карло, методика минимизации неопределенности, прослеживаемость.

Підписано до друку 03.03.2016 р.
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Облік.-вид. арк. 0,89.
Тираж 100 прим. Зам. №10

Видавництво «Ліга-Прес». 79008, Львів, а/с 11018
Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 200 від 27.09.2000 р.