

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник –
кандидат технічних наук, доцент
Паракуда В.В.

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Учений секретар спеціалізованої

вченої ради

/Т. Бубела/

Львів-2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ	
СЕРЕДОВИЩІ.....	
1.1 Задачі метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку в рідинах.....	19
1.2 Аналіз існуючих методів вимірювання потужності ультразвуку	28
1.3 Проблеми побудови еталонів одиниць вимірювання в умовах обмежених ресурсів.....	38
1.4 Постановка задачі і методи дослідження	41
1.5 Висновки до розділу 1	42
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДТВОРЕННЯ І	
ПЕРЕДАВАННЯ ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ ВИПРОМІНЮВАНОВОГО	
УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	
2.1 Загальні положення, терміни та визначення	45
2.2 Фізичні процеси поширення високочастотного ультразвуку у водному середовищі	46
2.3 Математична модель вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку.....	52
2.4 Математична модель процесу випромінювання акустичної потужності ультразвуковим випромінювачем	62
2.5 Висновки до розділу 2	70
РОЗДІЛ 3 АДАПТИВНИЙ МЕТОД СТВОРЕННЯ ЕТАЛОНІВ ОДИНИЦЬ	
ВИМІРЮВАННЯ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ	
3.1 Удосконалення методики мінімізації непевності	71
3.2. Адаптивний метод створення еталонів одиниць вимірювання.....	77
3.2. Проектування еталона з використанням адаптивного методу	81

3.3 Структурно-функціональна схема еталона	91	
3.4 Висновки до розділу 3	92	
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ		
ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ		94
4.1 Дослідження метрологічних характеристик еталонної уставу	96	
4.2 Оцінювання непевності вимірювання еталонної уставу	104	
4.2.1 Аналітичний метод оцінювання непевності вимірювання	104	
4.2.2 Застосування методу Монте-Карло для дослідження непевності вимірювання	106	
4.3 Створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі	110	
4.4 Розроблення нормативної бази передавання розміру одиниці потужності ультразвуку	113	
4.4.1 Повірочна схема передавання розміру одиниці потужності ультразвуку	114	
4.5 Висновки до розділу 4	116	
ВИСНОВКИ.....	117	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	120	
Додаток А Оцінка необхідних ресурсів для створення еталона та вибір обладнання.....	135	
Додаток Б Методика атестації еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.....	147	
Додаток В Розрахунок коефіцієнтів чутливості.....	176	
Додаток Г Програма для імітаційного моделювання процесу вимірювання на еталонній уставі одиниці потужності ультразвуку за методом Монте- Карло.....	179	
Додаток Д Свідоцтва метрологічної атестації еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі за 2010 рік та 2011 рік.....	184	
Додаток Е Висновок міжвідомчої комісії, акти випробувань, накази щодо еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.....	189	

Додаток Ж Локальна повірочна схема для засобів вимірювання потужності ультразвук у водному середовищі та наказ про її затвердження.....	199
Додаток З Титульні аркуші методики перевірки вимірювачів потужності ультразвуку та методики калібрування ультразвукових випромінювачів....	209

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

метод PUMA	- методика мінімізації непевності
MCM	- метод Монте-Карло
НСП	- невилучена систематична похибка
СКВ	- середньоквадратичний відхил
ТЗ	- технічне завдання
Угода СІРМ МРА	- Угода про взаємне визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювання, що видаються національними метрологічними інститутами
УзВ	- ультразвуковий випромінювач
УМО	- ультразвукове медичне обладнання

ВСТУП

Актуальність теми

Об'єми робіт, пов'язаних з вимірюваннями, які відіграють визначальну роль у забезпеченні якості товарів та послуг у промисловості, соціальній сфері, торгівлі та, у кінцевому результаті, визначають якість життя в сучасному постіндустріальному суспільстві, безперервно зростають. У передових розвинених країнах це складає значну частку валового внутрішнього продукту.

Вимірювання поширюються на нові «нетрадиційні» галузі. Якщо на момент підписання Метричної Конвенції (1875 рік) метрологія поширювалась тільки на масу і довжину і ще донедавна, так звана, «класична метрологія» розглядала лише вимірювання фізичних величин, то вже на 21-й Генеральній Конференції Мір і Ваги (1999 р.) було відзначено, що метрологія поширюється майже на всі галузі науки і техніки, у тому числі і на такі, як хімія, біологія, медицина [1, 2]. Завдяки підвищенню точності вимірювання значно покращується якість діагностування, що забезпечує шанси на успішне лікування. Підвищення точності вимірювання і дотримання встановлених параметрів та доз, наприклад, при застосуванні ультразвукових методів у фізіотерапії та хірургії, покращує ефективність лікування; похибки ведуть до негативних наслідків аж до летальних.

В Україні відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» (який спрямований на захист громадян і національної економіки від наслідків недостовірних результатів вимірювання) на вимірювання, результати яких використовуються під час робіт з охорони здоров'я, захисту життя і здоров'я громадян, поширюється державний метрологічний нагляд, що здійснюється з метою перевірки додержання вимог Закону, інших нормативно-правових актів і нормативних документів [3, 4].

На сьогодні у зв'язку з глобалізацією національних економік, розширенням міжнародної співпраці та усуненням технічних бар'єрів у торгівлі перед світовою спільнотою метрологів постало завдання створення глобальної системи забезпечення єдності вимірювання, результати якого простежувались би до національних еталонів одиниць SI та визнавались би у всьому світі. Ключова роль у цьому відводиться національним еталонам одиниць вимірювання, які є науково-технічною основою забезпечення єдності вимірювання у державі та які повинні періодично брати участь у міжнародних звіреннях, а їх калібрувальні та вимірювальні можливості (CMC_S-дані) публікуватися у додатку С до Угоди про взаємне визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювання, що видаються національними метрологічними інститутами (Угоди СІРМ МРА) [5].

Особливо гостро проблема створення сучасної еталонної бази стоїть перед Україною, яка поступово входить в європейський та світовий економічний простір. Після одержання Україною самостійності всі основні еталони разом з конструкторською та методичною документацією залишилися в Росії. За цей час, у зв'язку з поширенням метрології на інші галузі, виникли також нові завдання [4]. За станом на травень 2008 року до складу національної еталонної бази України входило 57 державних еталонів. У той же час кількість національних еталонів у розвинених країнах лежить у межах від 120 до 150 одиниць.

Зрозуміло, що в якості національних еталонів в Україні можуть бути використані і ті засоби вимірювальної техніки, метрологічна атестація яких здійснюється за кордоном або навіть еталони, які були придбані за кордоном у розвинених країнах світу. При цьому буде забезпечено взаємне визнання еталонів та сертифікатів, подолані технічні перешкоди в торгівлі. Але розвитку національної метрології це не буде допомагати, оскільки національна метрологічна система буде опиратися на результати роботи закордонних метрологічних організацій [6].

Тому державна метрологічна система, яка базується на власній еталонній базі, забезпечує незалежне від закордонних метрологічних центрів зберігання та відтворення одиниці вимірювання та допомагає досягнути рівноправні та взаємовигідні міждержавні відношення в науково-технічній, економічній, соціальній та політичній сферах.

Враховуючи надзвичайну важливість еталонної бази для національної економіки, Урядом України була затверджена Державна програма розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки [7]. У рамках цієї програми необхідно було створити 29 і вдосконалити 24 державних первинних еталона, було створено 21 і вдосконалено 5 вторинних еталонів для забезпечення єдності вимірювання у державі [8]. Зокрема, створення еталона одиниці потужності ультразвуку було включено в Державну програму розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки для забезпечення єдності та точності вимірювання в галузі мегагерцового (медичного) ультразвуку у водному середовищі.

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 – розпилювання рідин, емульгації, сушки, очистки, горіння; при вимірюванні рівня або розходу рідини; у машино- та приладобудуванні для різання твердих і крихких матеріалів, зварки і пайки; під час флотації руд в гірничодобувній промисловості; для визначення властивостей і складу речовин; в ультразвуковій дефектоскопії; у навігації та звукопідводному зв'язку; під час геофізичних досліджень та в багатьох інших [9-14]. 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 руйнуються внаслідок нагрівання і/або кавітації живі тканини людського організму, що несе небезпеку як пацієнтам так і обслуговуючому медперсоналу [15].

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. Донедавна в Україні не існувало системи метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин у мегагерцовому діапазоні частот як такої: не було еталонів і схеми метрологічної перевірки (повірочної схеми) 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 постала важлива потреба створення системи метрологічного забезпечення вимірювання основних параметрів мегагерцового ультразвуку і побудови, в 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.

На сьогодні еталони одиниць вимірювання розробляють відповідно до чинних нормативних документів [16], аналогічно до розроблення інших приладів, машин і механізмів. Використовують емпіричні, суб'єктивні методи (метод «проб і помилок») на основі досвіду та інтуїції розробника. Схемо-технічні та конструкторські рішення приймають на основі евристичного підходу. Специфічні особливості еталонів, як унікальних вимірювальних інформаційних систем враховуються при цьому недостатньо.

З іншого боку Державна програма розвитку еталонної бази, в межах якої, як правило, розробляються еталони, фінансується з державного

бюджету в обмежених об'ємах. Тому перед розробниками стоїть непросте завдання пошуку таких методів побудови еталонів одиниць вимірювання, які б дали можливість в умовах обмежених ресурсів при мінімальних затратах створювати еталони міжнародного науково-технічного рівня відповідно до актуальних та перспективних потреб національної економіки.

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-вимірювальних технологій, 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 завдання 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 у 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.

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

¹ Термін «невизначеність» – буквальный переклад англійського терміну «uncertainty», не повністю відображає суті 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 лишається 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».

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 в дисертації та авторефераті,

отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві дисертантові належать: аналіз стану та рівня забезпечення єдності вимірювання акустичних величин в ультразвуковому діапазоні частот в Україні та за кордоном [29]; застосування методики мінімізації непевності (методу PUMA) та розрахунок бюджету непевності [87]; розроблення адаптивного методу створення еталонів одиниць вимірюваних величин [97, 98]; оцінювання непевності, безпосередня участь в аналізі і узагальненні результатів, виборі основних параметрів та схемо-технічних рішень у процесі побудови еталона [100, 101]; безпосередня участь у виконанні експериментів, аналізі та узагальненні результатів, оцінюванні непевності, розробленні математичної моделі процесу випромінювання акустичної потужності [105]; удосконалення математичної моделі вимірювання, застосування методу Монте-Карло, розроблення програмного забезпечення, виконання експериментальних досліджень та математичних обчислень [56, 57, 117-119]; безпосередня участь у розробленні схеми метрологічної перевірки [56]; узагальнення підходів на прикладі системи метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку [58-60].

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.

РОЗДІЛ 1

СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

На сьогодні вимірювання поширюються на нові «нетрадиційні» галузі і, відповідно, поширюється державний метрологічний нагляд майже на всі галузі науки і техніки, в тому числі і на такі, як хімія, біологія, медицина [1, 3]. Завдяки підвищенню точності вимірювання значно покращується якість діагностування, що забезпечує шанси на успішне лікування; похибки ж ведуть до негативних наслідків.

За кордоном за минуле десятиліття досягнуті значні успіхи в підвищенні метрологічного забезпечення в медицині. У 2003 році вступила в силу Директива IVD [17], яка вимагає простежуваності результатів вимірювання до еталонів вищого порядку, що забезпечує порівнюваність результатів не тільки в межах однієї лікарні і між лікарнями, але і на міжнародному рівні.

Міжнародний Комітет Мір і Ваги та Всесвітня Організація Охорони Здоров'я у 2002 році підписали Меморандум про взаєморозуміння з метою розвитку співробітництва з метрологічних аспектів у галузі клінічної хімії та лабораторної медицини [18].

У США Національний Інститут Еталонів у тісному співробітництві з медичною спільнотою (так само як у Японії і європейських країнах) розробляє велику кількість стандартних зразків, апаратури та інструментів, забезпечуючи точніші та простежувані результати вимірювання в лабораторній медицині.

Міжнародні організації відповідно до Директиви IVD [17] ініціювали новий напрямок у забезпеченні простежуваності, умовна назва якого JCTLM (Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine), з тим, щоб

підтримати всесвітню порівнюваність, надійність і еквівалентність результатів вимірювання в лабораторній медицині.

Швидкими темпами йде розширення застосування в медицині ультразвуку мегагерцового діапазону (так званого «медичного ультразвуку»). За оцінками зарубіжних фахівців у світі на сьогодні налічується 300 000 діагностичних ультразвукових апаратів, на яких щорічно проводиться до 250 мільйонів діагностичних досліджень. Уявлення про масштаби застосування ультразвуку можна скласти з того, що у Великобританії в 2005-2006 роках проведено приблизно 6 мільйонів діагностик з використанням ультразвуку, що складає 20 % всіх медичних діагностик. Усі вагітні в Англії підлягають принаймні одній діагностиці з використанням ультразвуку і приблизно 2 мільйони акушерських діагностик проводять в межах Державної служби охорони здоров'я (NHS) кожен рік. Приблизно 30 літотриптерів, 2 500 діагностичних ультразвукових приладів, 10 000 акушерських моніторів для вимірювання частоти серцевих скорочень (ЧСС) плоду та 20 000 апаратів для фізіотерапії використовують в межах NHS [19]. Ультразвук широко застосовується також у терапії та хірургії.

Активне застосування ультразвуку привело до створення складного ультразвукового медичного обладнання (УМО), найчисленнішою групою якої є прилади ультразвукової діагностики (рисунок 1.1) [15]. До цієї групи відноситься ехо-імпульсна діагностична апаратура – для ультразвукової візуалізації внутрішніх органів і структур людського тіла та оцінки їх розмірів, доплерівське діагностичне обладнання – для вимірювання параметрів кровообігу та руху внутрішніх органів та спеціалізовані прилади ультразвукової діагностики, серед яких акушерські монітори для вимірювання ЧСС плоду, ехо-енцефалоскопи для обстеження мозку, синускопи для обстеження носових і лобних пазух та інше.

Єдність та необхідна точність акустичних вимірювань при ультразвуковій діагностиці різко зменшує ризик встановлення неправильного діагнозу, а при ультразвуковій терапії та хірургії підвищує ефективність



Рисунок 1.1 – Ультразвукове медичне обладнання

лікування та попереджає в деяких випадках фатальні наслідки. Але ультразвукове випромінювання, як біологічно активний фактор, може завдати обслуговуючому медперсоналу шкоди і тому необхідно контролювати його рівень на робочому місці. З метою забезпечення правильного застосування приладів, методів, технологій та процедур стоїть завдання піддавати метрологічному контролю ці прилади, методи та процедури.

Близькість параметрів людського тіла, таких як густина і пружність, (і, відповідно, швидкість поширення звуку в тканинах людського тіла та їх акустичний імпеданс) до аналогічних параметрів дистильованої води зумовило використання порівняно добре розроблених гідроакустичних методів [20, 21] для вимірювання та контролю параметрів УМО. Тому, з метою забезпечення відтворюваності результатів вимірювання під час калібрування, метрологічної перевірки (повірки) або контролю вихідних параметрів УМО, використовують, як робоче середовище, дистильовану воду температурою $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$ і вмістом розчиненого кисню не більше 3-5 мг/л.

1.1 Задачі метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку в рідинах

Фізична природа ультразвуку і основні закони його поширення такі ж, як і для звукових хвиль будь-якого діапазону, його висока частота і, відповідно, мала довжина хвилі призводять до якісних змін і зумовлюють ряд його специфічних особливостей.

Мала довжина хвилі обумовлює променевий характер поширення ультразвукових хвиль, причому поблизу випромінювача поперечний розмір променя приблизно дорівнює розміру випромінювача. На великих перешкодах (або неоднорідностях) відбиття та заломлення ультразвукового променя має регулярний характер, на малих – виникає розсіяна хвиля, що дозволяє формувати в оптично непрозорих середовищах звукове зображення предметів. З короткими хвилями ультразвуку пов'язана також можливість фокусування ультразвукового променя і концентрувати звукову енергію в заданій точці середовища. Інтенсивна взаємодія ультразвуку із речовинами, значне поглинання ультразвуку середовищем, взаємодія його зі світлом, виникнення акустичних течій, радіаційної сили при взаємодії з перешкодою, дисперсії швидкості звуку в середовищі, кавітація та інше також пов'язані з короткою довжиною хвилі ультразвуку [9, 22, 23].

Всі ці специфічні особливості ультразвуку виділяють гідроакустичні вимірювання в мегагерцовому діапазоні частот у самотійну область з притаманними лише для неї методами та засобами. Тому методи і засоби метрологічного забезпечення, які добре розроблені для звукових та інфразвукових частот (для діапазону морської гідроакустики), не можна прямо використати для діапазону мегагерцових частот (для медичного ультразвуку).

При застосуванні ультразвуку в медицині необхідно поєднувати безпеку і ефективність його використання [15]. Відомо, що ультразвук достатньо високого рівня може привести до руйнування тканин людського

тіла через нагрівання і кавітацію. Разом з тим, деякі види сучасного діагностичного обладнання створюють акустичний тиск, близький до небезпечного рівня. При ультразвуковій діагностиці вагітності перевірка якості діагностичного обладнання і оцінка безпеки його застосування мають особливе значення. Точне значення акустичного тиску і прогнозований рівень нагрівання тканини під його впливом необхідні для оцінки співвідношення між потенціальною небезпекою та очікуваним ефектом від діагностики. Ефективна терапія та літотрипсія також залежать від точності визначення акустичних характеристик апаратури. Продовжують розвиватись медичні технології, які застосовують руйнівну здатність ультразвуку. Застосування сфокусованого ультразвуку високої інтенсивності для руйнування пухлин швидко розвивається у всьому світі і має великі перспективи.

Для визначення характеристик ультразвукових полів у водному середовищі необхідно забезпечити вимірювання основних фізичних величин, які їх характеризують, зокрема, акустичного тиску, потужності та інтенсивності ультразвуку, швидкості поширення звуку у воді. Параметри акустичного поля взаємопов'язані, тому кожен з них може бути визначений як прямим методом, так і шляхом розрахунку з використанням результату вимірювання інших акустичних параметрів.

Одним з основних параметрів, який нормується для всіх видів УМО, є потужність ультразвукового променя, який генерується ультразвуковим випромінювачем. Для визначення інтенсивності ультразвукового випромінювання терапевтичної та діагностичної ультразвукової апаратури необхідно знати потужність. Для хірургічної апаратури контроль потужності ультразвуку необхідний для визначення тривалості дії ультразвуку з метою визначення необхідної дози опромінення. Для терапевтичної апаратури необхідно забезпечити можливість регулювання вихідної ультразвукової потужності в заданому діапазоні та її стабільність при зміні напруги мережі

живлення. Потужність ультразвукового поля повинна бути достатньою для ефективного лікування і одночасно безпечною для організму пацієнта.

У всіх цих випадках вимагається достатня точність та достовірність результатів вимірювання, які простежуються до еталонів системи одиниць SI, а у зв'язку з розширенням міжнародної співпраці та глобалізацією економіки, визнаються на міжнародному рівні [5].

З метою забезпечення правильного застосування приладів, методів, технологій та процедур стоїть завдання піддавати метрологічному контролю ці прилади, методи та процедури.

Метрологічне забезпечення будь-якого виду вимірювання передбачає, як відомо [24-28], комплекс організаційно-технічних заходів, який забезпечує єдність та необхідну точність результатів вимірювання величин, тобто наявність відповідної нормативно-правової та нормативно-технічної бази, оптимальної номенклатури вимірюваних параметрів і норм точності, наявність найбільш досконалих методик вимірювання, робочих і еталонних засобів вимірювання, надійного метрологічного обслуговування, забезпечення умов вимірювання та підготовку виробничого персоналу відповідної кваліфікації.

Над розв'язанням проблеми метрологічного забезпечення ультразвукових вимірювань працюють вчені різних країн [29]

Технічним комітетом ТК 87 «Ультразвук» Міжнародної Електротехнічної Комісії (IEC) розроблено більше 30 міжнародних стандартів, які регламентують методи та засоби вимірювання характеристик ультразвуку, зокрема, близько 20 стандартів регламентують методи калібрування гідрофонів та визначення характеристик ультразвукових полів частотою до 40 МГц за допомогою гідрофонів [30, 31], вимірювання ультразвукової потужності в діапазоні частот від 0,5 МГц до 25 МГц [32, 33], а також параметри медичної ультразвукової апаратури та всі аспекти їх метрологічного забезпечення [34-45]. Функціонують первинні і робочі еталони одиниці потужності ультразвуку, одиниці звукового тиску і

швидкості ультразвуку у водному середовищі, діє розгалужена метрологічна інфраструктура.

Еталони одиниці потужності ультразвуку (див. рисунки 1.2-1.4) мають США, Великобританія, Німеччина, Канада та ін.



Рисунок 1.2 – Еталони потужності ультразвуку ЭИМУ-1 та ЭИМУ-2 (Росія)



Рисунок 1.3 – Переносний еталон потужності ультразвуку PPS (Великобританія)

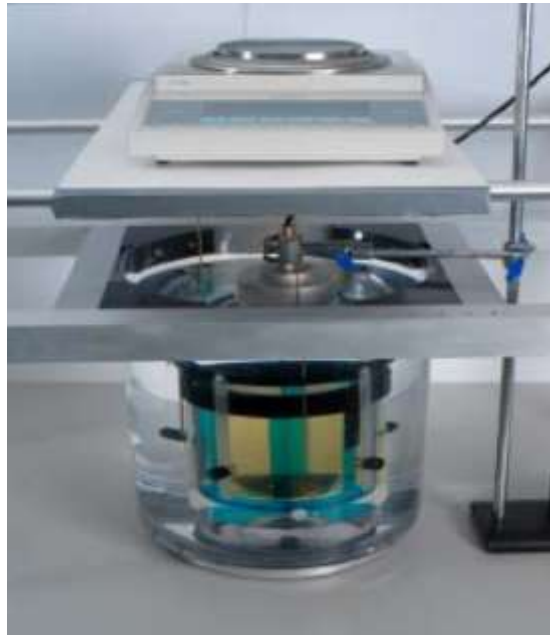


Рисунок 1.4 – Вимірювач потужності ультразвуку > 300 Вт (Великобританія)

Потужність ультразвуку в них відтворюється в діапазоні від тисячних часток Вт до десятків Вт (у США до 35 Вт) в діапазоні частот від 0,5 МГц до 30 МГц (див. таблицю 1.1). Згідно з даними, отриманими при ключових міжнародних звіреннях національних первинних еталонів одиниці потужності [46], непевність вимірювання знаходиться в межах від 4,1 % до 24,2 % у діапазоні частот від 1,9 МГц до 10,5 МГц, а відхилення від опорного значення ключового звірення, яке приблизно відповідає невилученій систематичній похибці (НСП) еталона, лежить у межах від 1 % до 19 %.

Як приклад комплексного підходу до вирішення проблеми метрологічного забезпечення ультразвукового вимірювання можна вважати Програму метрологічного забезпечення акустичних вимірювань, яку на кожні три роки розробляє і реалізує для своєї країни Національна фізична лабораторія (NPL) Великобританії [19, 47-5019]. Програма містить окремий розділ „Еталони ультразвукові для медицини та промисловості”, який присвячений ультразвуковим випромінюванням.

Таблиця 1.1 – Розширені непевності у вимірюванні при наданні послуг з калібрування ультразвукових випромінювачів, заявлені розвиненими країнами світу і опубліковані в додатку С до Угоди CIPM MRA станом на червень 2009 р.

НМІ	Країна	Вимірювання потужності					
		непевність, %		частота, МГц		потужність, Вт	
		від	до	від	до	від	до
PTB	Німеччина	3	12	1	21	0,002	20
NRC	Канада	7	10	1	3,5	0,5	10
CENAM	Мексика	11		1	10	0,01	1
NPL	Великобританія	2,5	6	0,8	20	0,0005	20
NIST	США	2		0,5	30	0,005	35
UME	Туреччина	5		1	3	0,1	1
VNIIFTRI	Росія	5	6	0,5	15	0,002	12
NIM	Китай	5		1	5	0,0003	20
INRIM	Італія	3	8	1,8	11	0,01	15

- завершення установки нового інтерферометра і його валідація до частот 60 МГц;

- розроблення методу і вимірювального обладнання для вимірювання відносної фазової чутливості гідрофонів діапазону частот від 1 МГц до 20 МГц.

б) підтримання функціонування існуючих первинного і вторинного еталонів потужності ультразвуку, в яких реалізований метод балансу сил;

- встановлення нового еталонного обладнання для забезпечення діапазону вимірювання від 50 мВт до 10 Вт;

- розроблення не коштовного і зручного для терапевтів твердотілого вимірювача потужності.

в) розроблення стандарту щодо безпечної дози медичного ультразвуку.

г) поширення удосконалених еталонів і методів вимірювання параметрів ультразвукових полів у промисловості та закладах охорони здоров'я Великобританії;

- розроблення вторинного еталону для вимірювання у жорстко сфокусованих ультразвукових полях з використанням нових гідрофонів з діаметром чутливого елемента 0,1-0,2 мм;

- розроблення вимірювального обладнання для визначення швидкості звуку у воді з непевністю не гірше $\pm 0,2$ м/с;

- поширення передового досвіду вимірювання параметрів ультразвукових полів у фізіотерапії проведенням шкіл-семінарів і випуском додатку до стандарту ІЕС, який допускає використання апаратури балансу сил.

д) покращення існуючого в NPL еталонного обладнання і методів вимірювання параметрів потужного ультразвуку, у тому числі в умовах кавітації;

- співпраця з промисловими підприємствами Великобританії та академічними установами щодо методів калібрування детекторів кавітації;

- підтримання дослідження нових перспективних сенсорів кавітації та оцінка ефективності очищення ультразвуком.

Аналогічна програма на 2004-2007 роки [48], яка є логічним продовженням попередньої програми, передбачає окрім подальшого розвитку перелічених робіт, вивчення нагрівання тканин людського тіла під впливом медичного ультразвуку та вимірювання кавітації, яка виникає під дією медичного та промислового ультразвуку.

На наступні роки, а саме 2008-2015 роки, [19, 49, 50] основним завданням NPL у галузі ультразвукових вимірювань були розширення, вдосконалення та підтримання на відповідному рівні первинних еталонів одиниці потужності ультразвуку та одиниці ультразвукового тиску. Також було передбачено проведення необхідних заходів для забезпечення більш широкого поширення (вимірювання потужності вище 500 Вт, калібрування гідрофонів вище 100 МГц, сучасні тест-об'єкти) інтернаціональних гармонізованих еталонів та методів вимірювання тиску та потужності ультразвуку, для того, щоб виробники ультразвукових приладів та

дослідного обладнання отримали більші можливості для його розроблення та продажу на ринках, а відповідно користувачі мали більшу довіру, щодо ефективності та безпечного використання.

В Україні існує численний парк ультразвукового терапевтичного, хірургічного та діагностичного медичного обладнання, переважно закордонного виробництва. Практично кожна клініка і лікарня оснащена таким обладнанням.

Вимагається, щоб терапевтичне і хірургічне ультразвукове обладнання було безпечним для пацієнта і обслуговуючого медичного персоналу та забезпечувало ефективність при лікуванні. Тому основні його характеристики необхідно контролювати не тільки при випуску чи сертифікації (у випадку імпорту з-за кордону), але і впродовж всього періоду експлуатації. Діагностичні ультразвукові прилади призначені перш за все для одержання кількісної вимірювальної інформації і тому віднесені до засобів вимірювання.

На вимірювання, результати яких використовуються під час робіт із забезпечення охорони здоров'я, забезпечення захисту життя та здоров'я громадян, поширюється державний метрологічний нагляд відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [3]. Але п'ять міждержавних стандартів, які діяли на початок дисертаційних досліджень в Україні [51-55], не охоплювали всіх аспектів вимірювання в галузі медичного ультразвуку та параметрів акустичного виходу медичної апаратури.

Для оцінки якості ехо-сканерів та відповідності їх характеристик технічним вимогам у метрологічних центрах України, згідно з даними на початок виконання досліджень (2007 рік), використовували тест-об'єкт «Міри акустичної довжини МАД-05» вітчизняного виробництва (НВ ТОВ «Ескулап-УЗТ») (23 штуки), фантоми тканинноеквівалентні RMI 403 GSE виробництва США (Gammex «RMI») (три штуки) та один – міра МАПР-1 російського виробництва [29]. Тест-об'єкт (фантом) [15] імітує певні параметри людського тіла і служать для оцінки характеристик

ультразвукового діагностичного обладнання відповідно до міжнародних стандартів [36, 38, 39]. Але за допомогою тест-об'єкта перевіряють лише лінійні параметри, не контролюючи інтенсивність випромінюваного ультразвуку.

Для контролю параметрів апаратів ультразвукової терапії у метрологічних центрах України були окремі робочі засоби вимірювання: вимірювачі потужності «ИМУТАП» і «ИМА-2» (виробництва Російської Федерації), вимірювач потужності «ИМУ-Квант» (виробник завод «Квант», Україна), вимірювач URM-DT-10 виробництва США («Ohmic Instruments со.», США). Але в робочих засобах вимірювання («ИМУ-Квант», URM-DT-10) за відсутності еталона одиниці потужності ультразвук перевіряли, фактично, під час метрологічної перевірки лише ваги (за допомогою різноважок, які встановлювали на коромисло мішені). Надзвичайно складний гідро- і термодинамічний процес випромінювання, поширення і взаємодії пружних ультразвукових хвиль з границями і твердою перешкодою (мішенню) насправді ігнорувався [56, 57]. І отже, не забезпечувалась простежуваність вимірювання до еталонів системи одиниць SI (Вт), утворювався розрив між одиницею потужності (Вт) та одиницею маси (кг) [58-60].

Вимірювач потужності і частоти ультразвукового випромінювання терапевтичних апаратів портативний «ИМУТАП», відповідно до його експлуатаційної документації, перевірявся за допомогою апаратів УЗ-терапії 1.01Ф та Forte Ultrasound, для контролю вихідних акустичних параметрів яких він і призначений. А це є прямим порушенням основних принципів простежуваності і побудови схем метрологічної перевірки передавання одиниці вимірювання [56-60].

У результаті інструментальна похибка робочих засобів вимірювання могла перевищувати $\pm 50\%$, що абсолютно недопустимо.

Як видно з викладеного вище, станом на початок 2007 року в Україні метрологічне забезпечення вимірювання в галузі мегагерцового (медичного)

ультразвуку у водному середовищі, знаходилося в зародковому стані: були наявні лише окремі елементи, але системи метрологічного забезпечення, як такої, не існувало. Були відсутні первинні еталони. Не було державної схеми метрологічної перевірки передавання розміру одиниць фізичних величин, які характеризують ультразвук (не забезпечена простежуваність результатів вимірювання), не розроблений достатній комплект нормативно-технічних документів, не налагоджене на належному рівні функціонування метрологічної інфраструктури. Вимірювання за таких умов не можуть бути легітимними. Частина медичної вимірювальної апаратури була переведена в клас індикаторної, що різко понижує її якість.

Тому створення еталона одиниці потужності ультразвуку актуально для забезпечення єдності та точності вимірювання в галузі «медичного» ультразвуку у водному середовищі і було включено в Державну програму розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки [7].

1.2 Аналіз існуючих методів вимірювання потужності ультразвуку

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

Відомо багато методів вимірювання потужності, які ґрунтуються на різних фізичних ефектах ультразвуку.

На принципі перетворення акустичної енергії в теплову ґрунтуються калориметричні методи [61]. Оптичні методи базуються на теорії дифракції світла на ультразвукових хвилях, відповідно до якої швидкість поширення світла залежить від густини рідини, яка в свою чергу, залежить від амплітуди звукового тиску в точці проходження світлового променя [62].

Потужність (інтенсивність) ультразвуку можна визначити, вимірюючи за допомогою гідрофона акустичний тиск в ультразвуковому промені і визначивши питомий акустичний опір середовища [63].

Але найчастіше для вимірювання потужності ультразвукового пучка використовується метод врівноваження (балансу) радіаційного тиску. Цей метод ґрунтується на ефекті другого порядку, який називається радіаційним тиском, який виникає під час динамічної взаємодії ультразвукового променя з перешкодою. Розроблено кілька його модифікацій, у тому числі: метод з використанням двошарових рідин різної густини, нерозчинних одна в одній; метод з плаваючою мішенню, метод з нерухомою мішенню та інше [64-69]. Із них стандартизований один – це метод гравіметричного балансу радіаційної сили [33]. Очевидною перевагою методу балансу радіаційного тиску є відносна простота його технічної реалізації і малий час проведення вимірювання.

Прилади побудовані на принципі радіаційного тиску називаються радіометрами. Радіометр повинен складатися з мішені, з'єднаної з балансом. Ультразвуковий промінь направляєється на мішень вертикально вгору або вниз. Радіаційна сила ультразвукового променя вимірюється урівноваженням мішені (балансуванням) електронними або прецизійними механічними вагами (терезами). Потужність ультразвукового променя визначають як різницю між силами, прикладеними для балансування мішені в стані спокою і при опроміненні її ультразвуковим променем.

Мішені можуть бути поглинаючі або відбиваючі випуклого чи ввігнутого типу. На рисунку 1.5 подано блок-схему устави для вимірювання потужності ультразвуку методом балансу радіаційних сил з відбиваючою конічною мішенню випуклого типу [33]. Півкут конуса у випадку випуклого типу мішені приймають рівним 45° для того, щоб відбита хвиля поширювалася під прямим кутом до осі ультразвукового променя. У випадку ввігнутого типу мішені півкут конуса знаходиться в межах від 60° до 65° .

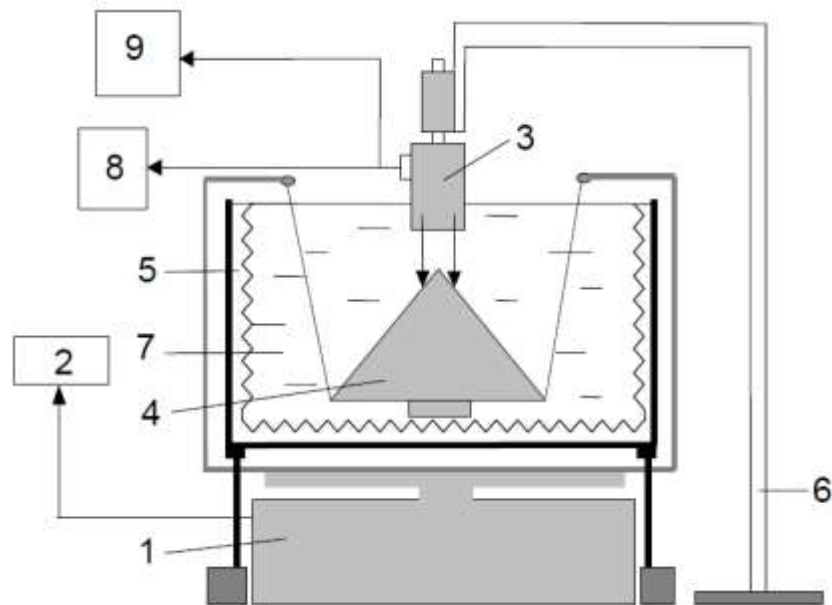


Рисунок 1.5 – Блок-схема устави для вимірювання потужності методом балансу радіаційних сил з відбиваючою мішенню випуклого типу:

- 1 – вага;
- 2 – пульт керування вагою;
- 3 – випромінювач;
- 4 – мішень;
- 5 – бокові поглиначі;
- 6 – тримач випромінювача;
- 7 – вимірювально ємність з водою;
- 8 – генератор з підсилювачем;
- 9 - вольтметр

На рисунку 1.6 подано блок-схему устави для вимірювання потужності ультразвуку методом балансу радіаційних сил з поглинаючою мішенню [33]. Устави працюють аналогічно.

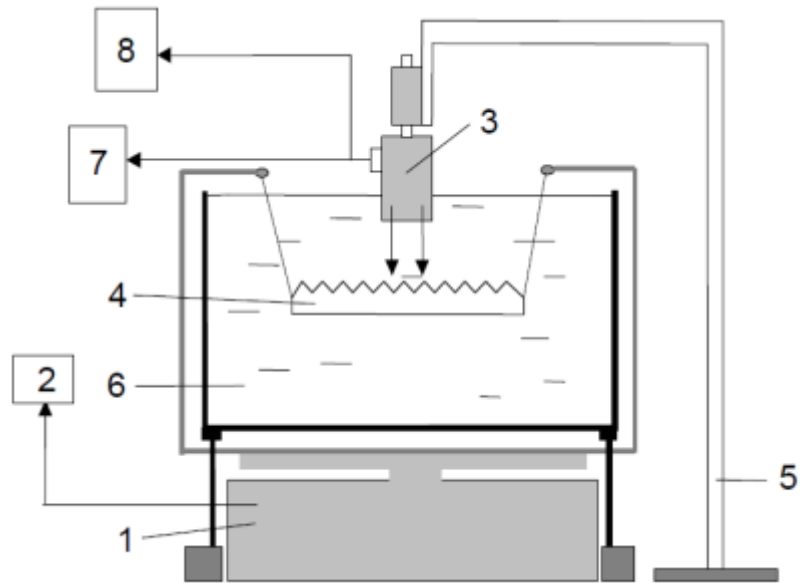


Рисунок 1.6 - Блок-схема устави для вимірювання потужності методом балансу радіаційних сил з поглинаючою мішенню:

- 1 – вага;
- 2 – пульт керування вагою;
- 3 – випромінювач;
- 4 – мішень;
- 5 – тримач випромінювача;
- 6 – вимірювальна ємність з водою;
- 7 – генератор з підсилювачем;
- 8 - вольтметр

На рисунку 1.7 подано вигляд поглинаючої та відбиваючої мішені [68]. На рисунку 1.8 зображено один з можливих варіантів вигляду акустичної частини еталонної устави з відбиваючою мішенню для вимірювання потужності ультразвуку [68].



Рисунок 1.7 – Поглинаюча та відбиваюча мішені.

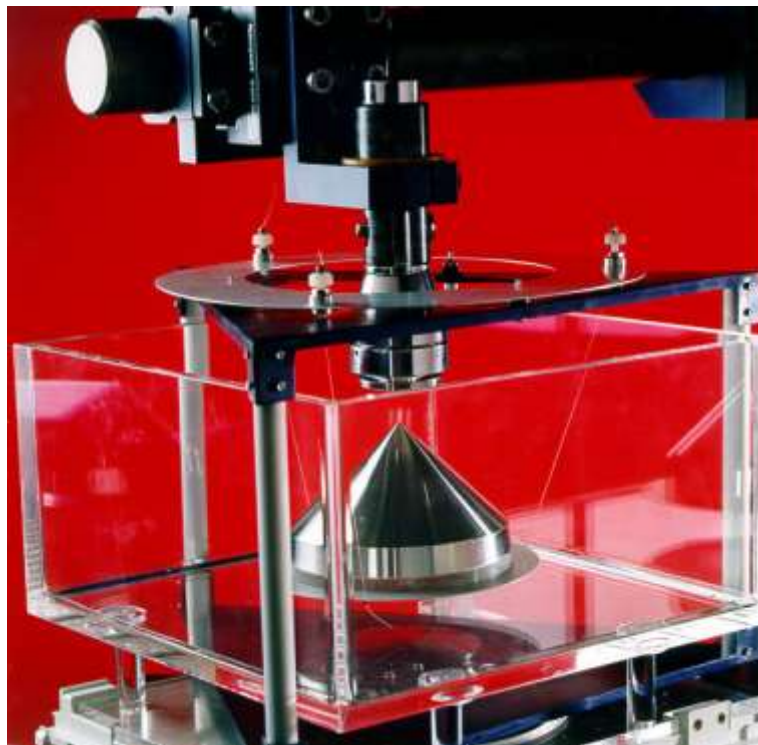


Рисунок 1.8 – Вигляд акустичної частини еталонної устави з відбиваючою мішенню для вимірювання потужності ультразвуку.

Існують модифікації методу радіаційного тиску, в яких використовується урівноважування мішені при її крученні під дією тиску ультразвукового променя, модулювання радіаційного тиску, метод занурення

мішені під дією радіаційних сил в яку-небудь важку рідину (наприклад тетрахлорид вуглецю або тетрахлоретилен) з використанням для урівноважування мішені архімедових сил, вимірювання горизонтального відхилення маленької пружної кульки (діаметром 0,5 мм), підвішеної в ультразвуковому полі на тонкій нитці.

В інших схемних рішеннях еталона замість ваг може бути використано:

- срібні ланцюжки за допомогою яких кріпиться мішень [70], наприклад, вимірювач ультразвукової потужності ИМУ-1ПМ (оптична головка);

- принцип компенсації радіаційного тиску ультразвуку протидіючим моментом магнітно-електричної системи (вимірювач акустичної потужності ИМА-2);

- урівноваження радіаційного тиску гідростатичним способом [69].

Схема вимірювача потужності, в якому мішень кріпиться за допомогою срібних ланцюжків [71].

У вимірювачах потужності ультразвукового випромінювання типу ИМУ-1ПМ (див. рисунок 1.9) реалізовано метод радіометра. У резервуарі з дистильованою водою плаває мішень, яка відтягується вниз тонкими срібними ланцюжками (див. рисунок 1.10). Тип мішені – відбиваюча, конічна ввігнута (з кутом конуса 130 градусів, діаметром 100 мм). При включенні випромінювача ультразвук діє на мішень зверху і вона починає опускатися поки не займе нове положення рівноваги. Зміщення мішені Δ пропорційне потужності ультразвукового пучка $W = k \Delta$. Зміщення мішені Δ вимірюється спеціальним пристроєм на основі оптичної головки типу ОГМЭ-ПЗ. Оптична головка для вимірювання зміщення мішені може переміщатися за допомогою редуктора і ручки обертання по стійці, закріпленій на платформі. Особливістю вимірювального пристрою є те, що він крім можливості відліку по шкалі барабану з ціною поділки 0,05 мм має можливість відліку безпосередньо по шкалі окуляра зі збільшенням у 70 разів, що суттєво

розширює можливості приладу при вимірюваннях малих потужностей (одиниці міліват), характерних для ультразвукової діагностичної апаратури.



Рисунок 1.9 – Вимірювач потужності ультразвукового випромінювання ИМУ-1ПМ

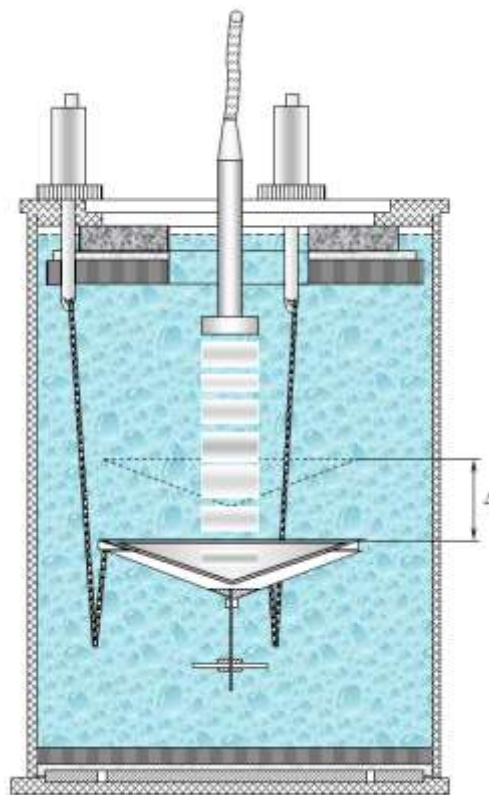


Рисунок 1.10 – Схематичне зображення вимірювача потужності ультразвукового випромінювання ИМУ-1ПМ

Для запобігання попаданню на мішень бокового випромінювання, відбитого від стінок резервуара, та випромінювання, відбитого від поверхні води, на дні резервуара і під кришкою знаходяться звукопоглинаючі килимки.

Схема вимірювача потужності з урівноваженням радіаційної сили магнітно-електричною системою [71].

Вимірювач акустичної потужності ИМА-2 [38] працює на принципі компенсації радіаційного тиску ультразвуку протидіючим моментом магнітно-електричної системи (див. рисунок 1.11).

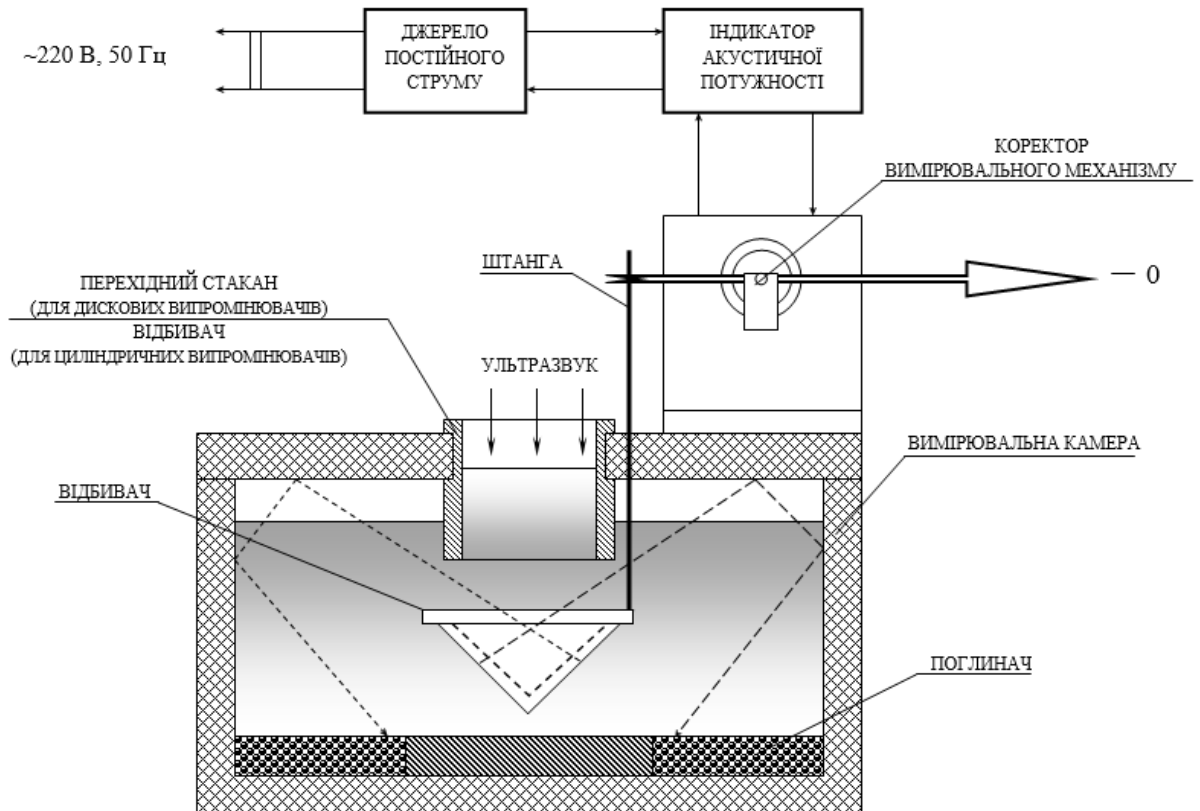


Рисунок 1.11 – Структурна схема приладу ИМА-2

Стрілка вимірювального механізму магнітоелектричної системи жорстко закріплена за допомогою штанги з порожнистим конічним відбивачем (мішенню), яка знаходиться у воді в стані рівноваги. Відхід

мішені від стану рівноваги внаслідок зміни температури або статичного тиску контролюється за стрілкою, яка перед вимірюваннями встановлюється на нульову відмітку. Під дією ультразвуку мішень переміщається вниз і стрілка відхиляється. Регулюванням величини постійного струму, який проходить через рамку і створює протидіючий момент, мішень повертається в вихідне положення і стрілка встановлюється на нуль. Сила струму, який проходить через рамку, реєструється вимірювальним приладом, шкалу якого калібрують у Ватах акустичної потужності.

Для калібрування приладу використовується такий абсолютний метод визначення акустичної потужності як метод зважування. Оскільки з одного боку силу F , що діє на мішень внаслідок наявності радіаційного тиску ультразвуку, і акустичну потужність W , пов'язує співвідношення:

$$F = \frac{2W}{c} \cdot \cos^2 \alpha, \quad (1.1)$$

де c – швидкість звуку у воді, м/с;

α – кут між напрямом поширення ультразвуку і нормаллю до мішені,

а з другого боку $F = P_{\text{Г вод}}$, де $P_{\text{Г вод}}$ – вага гирі, накладеної на мішень у воді.

Шкалу приладу у Ватах можна відкалібрувати поклавши на мішень відповідний тягар і відрахувуючи по шкалі вимірювального приладу силу струму, що протікає через рамку вимірювального приладу. Вага гирі у воді менша від ваги гирі у повітрі на величину сили, що виштовхує, тобто на вагу об'єму витісненої гирею води.

Схема вимірювача потужності з урівноваженням радіаційного тиску гідростатичним тиском [71].

Для ілюстрації такого способу використано варіант схеми, запропонованої в Австралії [69] з використанням тетраклорида вуглецю (див. рисунок 1.12).

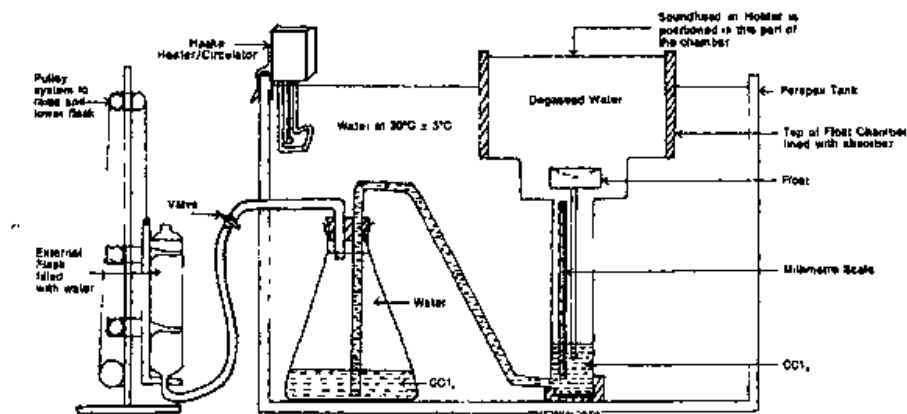


Рисунок 1.12 – Схема еталона з урівноваженням радіаційного тиску гідростатичним тиском

У даному методі замість балансу використовують поплавки із стрижнем. Ввігнутий конусний поплавок має більший діаметр ніж діаметр випромінювача. Стрижень поплавка частково знаходиться в тетрахлориді вуглецю і частково в дегазованій воді (верхня частина).

Поплавки калібрують за допомогою маленьких різноважок так, щоб один сантиметр вертикального переміщення був еквівалентний 1,77 Вт акустичної потужності.

Випромінювач знаходиться над поплавком. У верхній частині камери встановлений каучуковий белтінг (ремін) для поглинання відбитого ультразвукового променя.

Після активації випромінювача поплавок переміщається вниз. За допомогою блоків колб з водою на штативі (зліва на рисунку 1.12) поплавок піднімають вгору, збільшуючи гідростатичний тиск у системі доти, поки поплавок не повернеться у своє початкове положення за рахунок підняття рівня тетрахлориду вуглецю під дією тиску в кінчній колбі.

Різниця рівнів тетрахлорметану перед та після активації випромінювача приводиться до одиниць акустичної потужності (Вт) за допомогою коефіцієнта калібрування 1,77 Вт/см.

Температура води, навколишнього середовища, камери і тетраклорметану постійна: $30^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Найбільш прийнятний для реалізації в еталоні одиниці потужності ультразвуку у воді зі всіх існуючих методів є метод балансу радіаційного тиску з використанням прецизійної електронної ваги, рекомендований міжнародним стандартом ІЕС 61161 [33].

Переваги методу вимірювання радіаційного тиску полягають в тому, що:

- він не залежить від частоти ультразвукового пучка при умові відповідної корекції на поглинання ультразвуку, яка виникає на його шляху від випромінювача до мішені;
- простий у технічній реалізації;
- потребує малого часу для проведення вимірювання;
- найбільш детально вивчений і описаний.

Він знайшов застосування в державних еталонах США, Англії, Німеччини, Канади та інших країнах, дозволяє відтворювати одиницю потужності ультразвуку в діапазоні від тисячних часток Вт до десятків Вт у діапазоні частот від 0,8 МГц до 25 МГц.

1.3 Проблеми побудови еталонів одиниць вимірювання в умовах обмежених ресурсів

Підготовка до вступу України до Європейського союзу, глобалізація суспільно-економічних процесів у цілому особливо гостро ставлять проблему подальшого розвитку та вдосконалення державної метрологічної системи як законодавчої, технічної, нормативної і організаційної інфраструктури, що надає міжнародно визнану основу забезпечення єдності та необхідної точності вимірювання. А створення та вдосконалення сучасної національної

еталонної бази, організація її ефективного функціонування є основною умовою розвитку ефективної державної метрологічної системи.

Зрозуміло, що в якості національних еталонів в Україні можуть бути використані і ті засоби вимірювальної техніки, калібрування яких здійснюється за кордоном або навіть еталони, які були придбані за кордоном у розвинених країнах світу. При цьому буде забезпечено взаємне визнання еталонів та сертифікатів, подолані технічні бар'єри в торгівлі. Але розвитку національної метрології це не буде допомагати, оскільки національна метрологічна система буде опиратися на результати роботи закордонних метрологічних організацій [6].

Відомо [6], що річні витрати на калібрування вітчизняних засобів вимірювальної техніки високої точності в провідних закордонних метрологічних центрах можуть складати від декількох тисяч до декількох десятків тисяч USD для кожної відтворюваної одиниці фізичної величини. При цьому різниця між загальними витратами на створення державного еталона для відповідної фізичної величини і загальними витратами на модернізацію (закупівлю) вихідного еталона в умовах України також не перевищує декілька десятків тисяч USD. Оскільки рівень витрат на оплату праці розробників еталонів та виготовлення апаратури в економічних умовах, що склались в Україні, є набагато меншим, ніж у розвинених країнах.

Відповідно до [72] на сьогодні кількісні показники використання еталонної бази в цілому зросли до таких значень:

- на державних первинних еталонах щороку проводиться метрологічна перевірка та метрологічна атестація понад 5100 вторинних та робочих еталонів на загальну суму понад 2,1 мільйон гривень;

- на вторинних еталонах щороку проводиться метрологічна перевірка та метрологічна атестація понад 31700 робочих еталонів, високоточних робочих засобів вимірювальної техніки на загальну суму понад 38 мільйон гривень;

- робочі еталони, які пройшли метрологічну перевірку, калібрування, передають розміри одиниць вимірювання сотням мільйонів високоточних робочих засобів вимірювальної техніки в усіх галузях економіки, забезпечуючи одержання прибутку до 5 - 15 гривень на одну гривню витрат із створення еталонів.

Тому державна метрологічна система, яка базується на власній еталонній базі, забезпечує незалежне від закордонних метрологічних центрів зберігання та відтворення одиниці вимірювання та допомагає досягнути рівноправні та взаємовигідні міждержавні відношення в науково-технічній, економічній, соціальній та політичній сферах.

Враховуючи надзвичайну важливість еталонної бази для національної економіки, Урядом України терміном на п'ять років розробляється і затверджується Державна програма розвитку еталонної бази [7, 72]. Державна програма фінансується з державного бюджету в обмежених об'ємах. Тому перед розробниками постає непросте завдання пошуку таких методів побудови еталонів одиниць вимірювання, які б дали можливість в умовах обмежених ресурсів при мінімальних затратах створювати еталони міжнародного науково-технічного рівня відповідно до актуальних та перспективних потреб національної економіки.

На сьогодні еталони одиниць вимірювання розробляють відповідно до чинних нормативних документів [16, 73], аналогічно до розроблення інших приладів, машин і механізмів. Специфічні особливості еталону як засобу вимірювання, що являє собою вимірювально-інформаційну систему, яка повинна забезпечити, перш за все, максимальну (задану) точність відтворення одиниці вимірювання, враховуються при цьому недостатньо. Використовують емпіричні, суб'єктивні методи (метод «проб і помилок») на основі досвіду та інтуїції розробника. Схемо-технічні та конструкторські рішення приймають на основі евристичного підходу. Попередньо розробляють, як правило, ескізу документацію, виготовляють та випробують макети. Потім розробляють робочу конструкторську

документацію, виготовляють та випробують дослідний зразок, проводять дослідження його характеристик точності та метрологічну атестацію.

Такий підхід до створення еталонів доволі трудомісткий і не може дати оптимального рішення: вимірювальні канали такого еталону можуть включати прецизійні і, відповідно, високовартісні вимірювальні компоненти (прилади) в той час, як точність відтворення одиниці вимірювання можуть визначати інші компоненти з нижчими метрологічними характеристиками. У результаті на створення такого еталона витрачаються значні ресурси, але задані характеристики точності при цьому не досягаються.

Тому актуальним завданням є розроблення методу побудови еталонів одиниць вимірювання, який би передбачав адаптивний спосіб розроблення структурної, функціональної та принципівих схем еталона, конструкції окремих складових і еталона в цілому та алгоритму управління процесом вимірювання і оброблення вимірювальної інформації.

1.4 Постановка задачі і методи дослідження

Аналіз проведений вище, показав, що на початок дисертаційних досліджень у метрологічних центрах України використовували для оцінки якості апаратів ультразвукової діагностики та відповідності їх характеристик технічним вимогам тест-об'єкти, для контролю параметрів апаратів ультразвукової терапії робочі засоби вимірювання потужності ультразвуку. Але в державі були відсутні первинні еталони; не було державної схеми метрологічної перевірки передавання розміру одиниць фізичних величин, які характеризують ультразвук, тобто не була забезпечена простежуваність результатів вимірювання; не був розроблений достатній комплект нормативно-технічних документів; не було налагоджене на належному рівні функціонування метрологічної інфраструктури.

Отже, необхідно розробити науково-технічні засади метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин у воді в мегагерцовому діапазоні частот, зокрема, потужності ультразвуку у водному середовищі, для досягнення єдності та необхідної точності вимірювання в країні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин в ультразвуковому мегагерцовому діапазоні частот та методи вимірювання потужності ультразвуку.
2. Проаналізувати проблеми побудови еталонів одиниць вимірювання.
3. Виконати теоретичні дослідження поширення високочастотного ультразвуку в водному середовищі.
4. Розробити математичну модель вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку, випромінюваного у водне середовище.
5. Розробити новий адаптивний метод для створення еталонів одиниць вимірюваних величин із заданими високими характеристиками точності за умови обмежених ресурсів.
6. Створити еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.
7. Виконати експериментальні дослідження для визначення метрологічних характеристик створеного еталона.
8. Розробити методику та прикладне програмне забезпечення для оцінювання непевності вимірювання еталона.

1.5 Висновки до розділу 1

У першому розділі:

- проаналізовано сучасний стан метрологічного забезпечення вимірювання акустичних величин в ультразвуковому мегагерцовому діапазоні частот;

- проведено аналіз існуючих методів вимірювання потужності ультразвуку;
- розглянуто проблеми побудови еталонів одиниць вимірювання в умовах обмежених ресурсів;
- сформульовано основні задачі дослідження.

Встановлено, що:

- в Україні донедавна не було належної системи метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку: була відсутня еталонна база і відповідні нормативні документи;
- актуальним є створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі, який за своїми метрологічними характеристиками повинен відповідати сучасному світовому рівню та забезпечувати єдність і простежуваність вимірювання;
- найбільш прийнятний для реалізації в еталоні одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі прийнято метод балансу радіаційного тиску з використанням прецизійної електронної ваги;
- актуальним є розроблення раціонального методу побудови еталонів з метою створення за мінімальних витрат еталона міжнародного науково-технічного рівня відповідно до актуальних і перспективних потреб національної економіки в умовах обмеженого бюджетного фінансування.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [29, 56-60].

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДТВОРЕННЯ І ПЕРЕДАВАННЯ ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ ВИПРОМІНЮВАНОВОГО УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Ультразвукові хвилі за своєю природою не відрізняються від пружних звукових чи інфразвукових хвиль. Поширення ультразвуку підпорядковується основним законам, спільним для акустичних хвиль будь-якого діапазону та в першому наближенні описується хвильовим рівнянням, спільним для всіх частот. Але суттєву роль грає співвідношення між довжиною хвилі звуку λ та характерним для умов поширення геометричним розміром D , наприклад, розміром джерела звуку, або перешкоди на шляху поширення хвиль, розміром неоднорідностей середовища, характерним розміром поперечного перерізу хвилеводу та іншим [56].

Для ультразвукового діапазону, коли $\lambda \ll D$, характерне променеве поширення звуку, а також інтенсивна взаємодія з речовиною, швидке затухання та нагрівання середовища. На ультразвукових частотах порівняно легко досягають високої інтенсивності звукових хвиль (за даної амплітуди інтенсивність прямо пропорційна квадрату частоти) і проявляються нелінійні ефекти, порушується принцип суперпозиції, виникає взаємодія хвиль. На границях розділу середовищ з різними акустичними характеристиками виникає радіаційний тиск. З'являються акустичні течії, кавітація [22].

Ці та інші особливості мегагерцового ультразвуку з одного боку обумовлюють галузі його використання в науці, техніці та медицині, а з іншого – не дозволяють застосовувати добре розроблені для звукових та інфразвукових частот методи і засоби метрологічного забезпечення і таким чином виділяють ультразвукові вимірювання в окрему галузь з притаманними лише для неї методами і засобами [14, 23].

2.1 Загальні положення, терміни та визначення

У дисертації використано наступні терміни та визначення відповідно до [33, 55]:

Акустична течія – об’ємне переміщення рідини під дією звукового поля.

Ближнє поле - область акустичного (звукового) поля ультразвукового перетворювача, у якій відносна фаза миттєвого акустичного тиску та коливної швидкості постійно змінюється залежно від місця положення в акустичному (звуковому) полі.

Вільне поле - звукове поле в однорідному та ізотропному середовищі, в якому можна нехтувати впливами границь.

Вихідна потужність – усереднена за часом потужність ультразвуку, яка випромінюється ультразвуковим перетворювачем в умовах вільного поля або в конкретному середовищі, зазвичай у воді.

Геометричний радіус перетворювача (випромінювача) - радіус активного елемента перетворювача (випромінювача).

Дальнє поле - акустичне (звукове) поле на віддальх від ультразвукового перетворювача, на яких значення миттєвого акустичного тиску та коливальної швидкості частинок практично співпадають за фазою.

Електроакустична провідність перетворювача (випромінювача) – відношення акустичної вихідної потужності до квадрату ефективної (середньоквадратичної) електричної напруги на вході перетворювача (випромінювача).

Ефективний радіус нефокусуемого ультразвукового перетворювача (випромінювача) - радіус диску ідеального плоскопоршневого ультразвукового перетворювача (випромінювача), що має розрахунковий розподіл акустичного тиску вздовж осі приблизно

еквівалентний спостережуваному розподілу, принаймні, на віддалі до останнього максимуму на осі.

Мішень - пристрій, спеціально розроблений для того, щоб перехоплювати істотну частину ультразвукового поля та реагувати на радіаційну силу.

Радіаційна сила – усереднена за часом сила, яка діє на тіло в звуковому полі і обумовлена звуковим полем, за виключенням складових, пов'язаних з акустичними течіями; або, більш загально: усереднена за часом сила (за виключенням складових, пов'язаних з акустичними течіями) у звуковому полі, яка виникає на границі розділу двох середовищ з різними акустичними властивостями.

Ультразвуковий перетворювач (випромінювач) - пристрій, здатний перетворювати електричну енергію в механічну енергію в ультразвуковому діапазоні частот, та/або зворотне перетворення механічної енергії в електричну енергію.

2.2 Фізичні процеси поширення високочастотного ультразвуку у водному середовищі

Вивченню процесу поширення ультразвуку присвячені роботи таких видатних вчених як Дж. Релей, П. Ланжевен, В.А. Красильников [74], Л. Бергман [75], а також К. Weissner [76, 78, 79], Steven E. Fick і Dorea Ruggles [77], Herman B.A. і Harris G.R. [63].

Динамічні процеси в рідинному середовищі описують у загальному рівнянням Нав'є-Стокса [80]. Але, якщо в гідродинаміці вивчають рух в'язкої рідини і середовище розглядають як таке, що не стискається, то в акустиці навпаки, в'язкістю нехтують і досліджують поширення пружних хвиль у нерухомому середовищі. Тому в акустиці вважають, що густина ρ , тиск p ,

три компоненти коливної швидкості частинок $\mathcal{Q}_{1,2,3}$ та температура T , як функції f часу і координат¹ повністю визначають стан руху рідини під час поширення пружних хвиль. Щоб їх відшукати складають систему рівнянь, у які входять ці функції та їх похідні. Такими рівняннями є:

- *рівняння стану* – залежність тиску від густини і температури, яке подають через вільну енергію одиниці маси як її похідну за питомим об'ємом v , у тому числі:

за адіабатичного процесу:

$$p = (\partial u / \partial v)_s, \quad (2.1)$$

де u – внутрішня енергія одиниці маси,

s – ентропія,

v – питомий об'єм,

звідки рішенням першого порядку є:

$$p = p_0 + \rho' / \rho_0 \beta_s, \quad (2.2)$$

де p_0, ρ_0 - тиск та густина незбуреного середовища,

β_s - пружність адіабатична,

s – ентропія,

ρ' - малий приріст густини середовища;

- *рівняння збереження енергії* (за першим законом термодинаміки):

$$du = Tds - pdv, \text{ звідки } c_v dT - \alpha^{(v)} / \rho_0^2 \beta_T = 0, \quad (2.3)$$

¹ Зазвичай функції f у явному вигляді невідомі та/або нелінійні. Розв'язок шукають наближеними методами математичної фізики, одним з яких є метод малих збурень або метод послідовних наближень. Функції, які шукають за цим методом, подають у вигляді рядів Маклорена, які складені відносно малих відхилень параметрів стану незбуреного середовища. Значення цих параметрів беруть за розв'язок рівнянь нульового наближення і т.д.

де T – температура,

c_v - теплоємність за постійного об'єму,

$\alpha^{(v)}$ - коефіцієнт об'ємного розширення,

β_T - ізотермічна пружність.

- *рівняння неперервності*, що випливає із закону збереження маси речовини, яке у диференціальній формі виглядає як¹:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho g_i) = 0, \quad (2.4)$$

де x_i – осі ортогональної системи координат ($i = 1, 2, 3$),

g_i - компоненти швидкості по осях координат.

- *рівняння руху* (рівняння Ейлера):

$$\frac{d g_i}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad \text{або} \quad \frac{\partial g_i}{\partial t} + g_k \frac{\partial g_i}{\partial x_k} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0, \quad (2.5)$$

де $d g_i / dt$ - повне прискорення частинки рідини, що рухається;

$\partial g_i / \partial t$ - миттєве прискорення;

$g_k \cdot \partial g_i / \partial x_k$ - переносне прискорення.

У загальному вигляді ці рівняння нелінійні. Їх розв'язки, отримані наближеними методами, дозволяють визначити інтенсивність пружної хвилі (тобто середнє за часом значення вектору густини потоку енергії), зокрема для гармонійної біжучої плоскої хвилі, яка поширюється без згасання, інтенсивність J дорівнює:

$$J = \frac{p_o^2}{2 \rho_o c} = \frac{\rho_o g_o^2}{2} c, \quad (2.6)$$

¹ Рівняння (2.4), (2.5) та (2.11) записані за правилом повторних індексів.

де $p_o, \rho_o, \mathcal{G}_o$ - тиск, густина та коливна швидкість,

c – швидкість звуку;

а також обчислити густину звукової енергії, що необхідно для пошуку радіаційної сили. Наприклад, для гармонійної плоскої біжучої звукової хвилі середня за часом густини енергії E дорівнює:

$$E = \rho \mathcal{G}_o^2 / 2 = p_o^2 / 2 \rho c^2, \quad (2.7)$$

так як у цьому випадку $E_k = E_n$,

де $E_k = \rho \mathcal{G}_o^2 / 2$ - кінетична енергія,

$E_n = p_o^2 / 2 \rho c^2$ - потенціальна енергія,

p_o - амплітудне значення тиску,

\mathcal{G}_o - амплітудне значення коливної швидкості,

Середня питома (віднесена до одиниці площі) потужність біжучої гармонійної звукової хвилі w у цьому випадку співпадає з інтенсивністю:

$$w = p_o \mathcal{G}_o / 2. \quad (2.8)$$

Постійну силу, що діє в звуковому полі на тіло (акустичну радіаційну силу), розуміють як таку, що викликана фізичною величиною, відомою як тиск звукового випромінювання, або акустичний радіаційний тиск [22]. Радіаційний тиск ультразвукового випромінювання аналогічний тиску світла. Він, як величина другого порядку малості, незначний у порівнянні із змінним звуковим тиском. Так, за інтенсивності 10 Вт/см^2 амплітуда звукового тиску у воді складає $5 \cdot 10^6$ дін/см², а тиск звукового випромінювання (радіаційний тиск) дорівнює лише $1 \cdot 10^3$ дін/см². Наявність радіаційного тиску ультразвуку було вперше встановлено теоретично Дж.У. Релесем (тиск Релея). Він показав, що тиск звукового випромінювання на повністю відбиваючу плоску поверхню, коли плоска звукова хвиля в безмежному просторі падає на неї

нормально, пропорційний з точністю до членів 2-го порядку середній за часом та простором густині кінетичної енергії звукової хвилі.

Радіаційний тиск, що створюється обмеженою по фронту плоскою хвилею, вираховував в одномірному наближенні за деяких припущень П. Ланжевен (тиск Ланжевена) [22, 75]. Тиск Ланжевена дорівнює осередненій 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 на неї дорівнює [22]:

$$p = (1 + R^2)E, \quad (2.9)$$

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, поділений на швидкість звуку, порушується. Виникає взаємодія хвиль. Задача 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 [23]:

$$\frac{W}{F} = c, \quad (2.10)$$

яке можна розглядати лише як перше, досить грубе наближення [76].

У роботі [76] теоретично розглянуто модель взаємодії ультразвукового променя з мішенню адекватнішу до тієї, що практично реалізують у методі балансу радіаційної сили. Вихідне рівняння записано (у компонентах) для тривимірного звукового поля на підставі закону зміни моменту кількості руху і подано як тензор напружень \bar{S} .

$$\bar{S}_{ij} = -\bar{p} \cdot \delta_{ij} - \rho g_i g_j, \quad (2.11)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера;

\bar{p} – осереднений за часом звуковий тиск¹;

ρ – густина;

g_{ij} – ортогональні компоненти коливної швидкості частинок у системі координат Ейлера; $i, j = 1, 2, 3$.

Акустичну радіаційну силу F , визначено як подвійний інтеграл тензора по поверхні, прилеглий до мішені:

$$\bar{F} = -\iint \bar{S} d\bar{A}, \quad (2.12)$$

де $d\bar{A}$ – нескінченно малий векторний елемент поверхні.

Розв'язок рівняння отримано для плоско-поршневого поля і зони Френеля за згаданих вище спрощуючих припущень. Було показано, що співвідношення між випромінюваною ультразвуковою потужністю W і акустичною радіаційною силою F не є сталою величиною, а щонайменше є функцією параметра (ka) виду:

$$f(ka) = [1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka)] / [1 - J_1(ka)/ka], \quad (2.13)$$

¹ \bar{p} містить члени другого порядку, оскільки акустичний тиск першого порядку при усередненні за часом прямує до нуля; риска над літерою означає, що величина векторна.

де J_n - функція Бесселя 1-го роду порядку n ;

a – ефективний радіус активного елемента ультразвукового випромінювача (УзВ);

k – хвильове число.

Вплив скінчених розмірів мішені¹ на вимірювану потужність ультразвуку подано в [77, 78], нерівномірності розподілу амплітуди вібрації по поверхні активного елемента УзВ – в [79].

2.3 Математична модель вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку

Подані вище результати теоретичних досліджень покладено в основу розробленої математичної моделі – рівняння вимірювання, яке є підставою для коректного оцінювання непевності вимірювання. За отриманими теоретично частинними розв'язками оцінено частково значення поправок на зроблені припущення та їх непевності. Поправки і їх непевності, які неможливо було оцінити теоретично, визначено в процесі експериментальних досліджень.

Співвідношення (2.10), яке зв'язує значення радіаційної сили F , що діє на мішень, із значенням вихідної акустичної потужності W ультразвукового випромінювача у спрощеному вигляді, використано в стандарті [33]:

для ідеальної абсорбуючої мішені:

$$W = c \cdot F, \quad (2.14)$$

для ідеально відбиваючої мішені:

¹ Зауважимо, що у випадку, коли розміри мішені суттєво більші за розміри поперечного перерізу ультразвукового променя, тоді потужність випромінюваного ультразвуку стає характеристикою УзВ.

$$W = \frac{c \cdot F}{2 \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (2.15)$$

де c – швидкість звуку у воді;

φ – кут між напрямком поширення вихідної хвилі і нормаллю відбиваючої (конічної) поверхні.

Формули (2.14) і (2.15) справедливі для суттєво спрощеної ситуації [81]:

- первісне акустичне поле (випромінюване УзВ) представлено плоскою хвилею, що еквівалентно наближенню геометричної акустики;

- середовище, в якому формується акустичне поле, вважається ідеальним: поглинання енергії хвилі і в'язкість в ньому відсутні;

- мішень є достатньо великою, щоб перекрити весь поперечний переріз ультразвукового променя;

- зроблено припущення, що відбивання (або поглинання) є абсолютним при взаємодії хвилі з мішенню.

Для УзВ з круглою плоскою випромінюючою поверхнею радіуса a і з плоскою мішенню радіуса b , розташованою в одній площині з ним (див. рисунок 2.1), замість формули (2.14) з врахуванням (2.13) отримаємо співвідношення:

$$W = c \cdot F \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) \left(1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka) \right)^{-1}; \quad (2.16)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (2.17)$$

де W – потужність випромінюваного ультразвуку;

F - радіаційна сила, що діє на мішень;

J_n - функція Бесселя 1-го роду порядку n ;

a – радіус УзВ;

k – хвильове число;

λ – довжина акустичної хвилі;

f – частота.

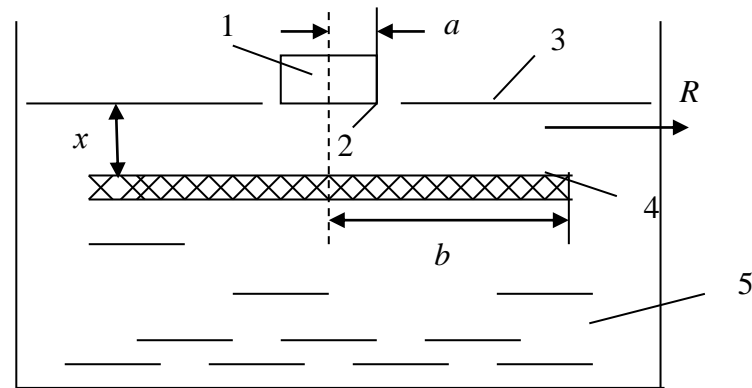


Рисунок 2.1 – Розташування УзВ та плоскої поглинаючої мішені:

- 1 – УзВ,
- 2 – випромінююча поверхня,
- 3 – поглинаюче покриття,
- 4 – поглинаюча мішень,
- 5 – середовище (дистильовано вода).

Формулу (2.16) одержано в наближенні ближнього поля, і розміри мішені в напрямку R , перпендикулярному осі УзВ, вважаються набагато більшими порівняно з радіусом a , при цьому дифракційні ефекти на границях, що обмежують розміри мішені в напрямку R , можна не брати до уваги. Зауважимо, що для абсолютно поглинаючої мішені її конфігурація не має суттєвого значення [76].

Для абсолютно відбиваючої мішені формулу (2.15) з врахуванням (2.13) модифіковано до вигляду, аналогічного виразу (2.16) при виконанні співвідношення (див. рисунок 2.2): $b \gg \lambda$, $b \gg a$, $h \gg \lambda$:

$$W = \frac{c \cdot F}{2 \cos^2 \varphi} \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) \left(1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka) \right)^{-1}; \quad (2.18)$$

де φ – кут між напрямком поширення вихідної хвилі і нормаллю відбиваючої (конічної) поверхні,
 решта позначень відповідають формулі (2.16).

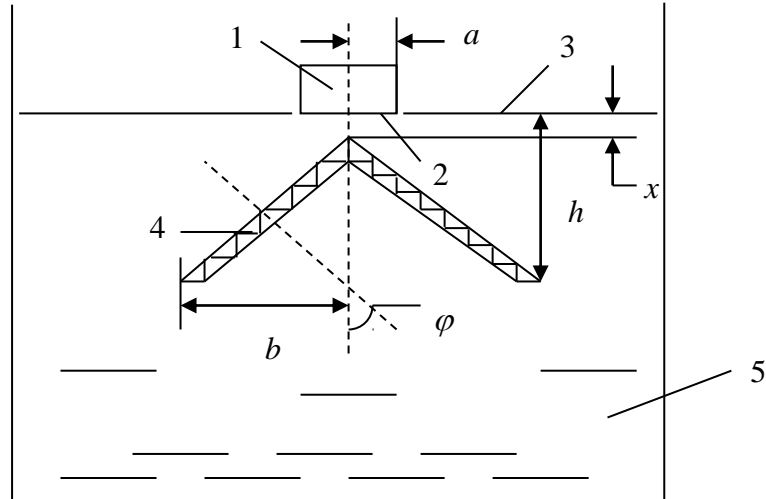


Рисунок 2.2 – Розташування УзВ та конічної опуклої відбиваючої мішені:

- 1 – УзВ,
- 2 – випромінююча поверхня,
- 3 – поглиначе покриття,
- 4 – опукла відбиваюча мішень,
- 5 – середовище (дистильовано вода).

Поглинаюче покриття 3 повинно бути абсолютно поглинаючим. Оскільки для рефлектора коефіцієнт відбивання первісного поля від поверхні мішені помітно відрізняється від нуля, у подальшому в математичній моделі враховано дифракційні явища в околі мішені.

На практиці використовують мішені, що мають акустичні властивості, які максимально наближені до ідеально абсорбуючих чи ідеально відбиваючих.

Відповідно до [33] мішень повинна відповідати ряду вимог. Плавучість мішені не повинна змінюватися при зміні тиску довкілля. Для забезпечення

цієї вимоги вона повинна мати найменшу стисливість, тому що коливання атмосферного тиску впливають на об'єм мішені, а значить і на її плавучість.

Поглинаючі мішені повинні забезпечувати поглинання не менше 99 % акустичної енергії, амплітудний коефіцієнт відбивання менше 3,5 %. Як правило, поглинаючі мішені – це круглі диски з пружного гумового матеріалу з клинами або без них. Для збільшення поглинаючої здатності матеріал повинен містити неоднорідності. Як неоднорідність можуть бути використані пустотілі скляні кульки діаметром близько 0,1 мм, оскільки вони не дуже впливають на густину і стисливість пружного гумового матеріалу. Можуть використовуватися абсорбуючі (поглинаючі) мішені клиноподібної форми, концентрація неоднорідності в яких збільшується від нуля до 30 % у напрямку їх тильної поверхні.

Відбиваючі мішені повинні мати амплітудний коефіцієнт відбивання більше 99 %. Як відбиваючі мішені застосовують конічні рефлектори, виготовлені з дуже жорсткого пінопласту, покритого тонким шаром металу, який нанесено гальванічним методом. Придатні рефлектори конічної форми, виготовлені у формі товстостінних порожнистих тіл або повітряно-підтримуючих тонких металічних пластин.

При виготовленні рефлектора з нержавіючої сталі необхідно забезпечити чистоту обробки його поверхні не більше ± 5 мкм [55].

Конічний рефлектор опуклого типу наведено на рисунку 2.2. Половина кута при вершині звичайно дорівнює 45° , тому кут між відбитою хвилею і віссю ультразвукового променя є прямим.

Конічний рефлектор увігнутого типу наведений на рисунку 2.3. Половина кута при вершині конуса звичайно обирається в межах $60^{\circ} \div 65^{\circ}$, тому відбита хвиля напрямлена ближче до ультразвукового перетворювача, ніж у випадку рефлекторів опуклого типу.

При виборі мішені необхідно враховувати, що конічна мішень опуклого типу під дією ультразвукового променя може зміщуватись від центра в область нижчої інтенсивності, і тоді кут падіння звукового променя

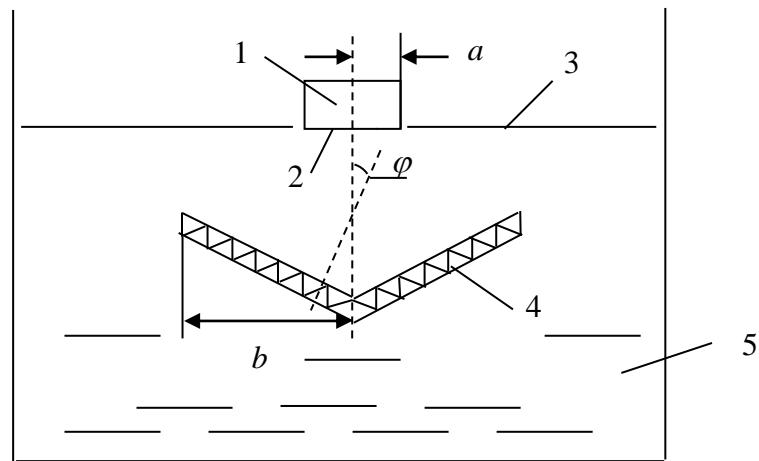


Рисунок 2.3 – Розташування УзВ та конічної увігнутої відбиваючої мішені

- 1 – УзВ,
- 2 – випромінююча поверхня,
- 3 – поглиначе покриття,
- 4 – увігнута відбиваюча мішень,
- 5 – середовище (дистильовано вода).

на мішень може змінюватись. У той же час, мішень увігнутого типу самоцентрується під дією ультразвукового променя. Вимірювальна ємність повинна бути захищена поглинаючим покриттям.

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 було вирішено для подальших досліджень розглядати абсорбуючу мішень.

Діаметр круглої поглинаючої мішені повинен бути достатнім, щоб перекрити ультразвуковий промінь і принаймні в 1,5 рази більшим від діаметра ультразвукового випромінювача. Він залежить від структури поля і відстані між мішенню і ультразвуковим перетворювачем. Мінімальний

радіус мішені, який забезпечує попадання на мішень 98 % радіаційної сили від сили, яка була б на мішені нескінченного розміру, розраховують за формулою [78, 33]:

$$b = a \left(\frac{1}{1 + 0.53\tau_1 s} + \tau_1 s \right), \quad (2.19)$$

$$\tau_1 = \tau_0 + \Delta\tau, \quad (2.20)$$

$$\tau_0 = ka / \left(2\pi(\beta^2 - 1)^{1/2} \right), \quad \beta = 0,98 + 0,01\pi ka, \quad (2.21)$$

$$\Delta\tau = \begin{cases} 0,7 & \text{якщо } ka \leq 9,3 \\ 6,51/ka & \text{якщо } 9,3 \leq ka \leq 65,1 \\ 0,1 & \text{якщо } 65,1 \leq ka \end{cases} \quad (2.22)$$

де a – радіус джерела ультразвукового перетворювача;

$k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число;

λ – довжина ультразвукової хвилі в середовищі поширення;

x – відстань між мішенню і ультразвуковим перетворювачем;

$s = x \cdot \lambda / a^2$ – відстань між мішенню і ультразвуковим перетворювачем, нормована на довжину ближнього поля.

За допомогою рівняння (2.19) можна також визначити максимальну нормовану відстань s між ультразвуковим перетворювачем і мішенню заданих розмірів.

При вимірюваннях на високих потужностях відстань між УзВ та абсорбуючою мішенню повинна бути не менше 8 мм [33], щоб уникнути зміни характеристик УзВ при прямій передачі тепла від поглинаючої мішені, яка може нагріватися при поглинанні ультразвуку.

Абсорбуюча плоска кругла мішень виготовлена із спеціального звукопоглинаючого матеріалу Nam A фірми Precision Acoustics Ltd (Англія) з клинами на фронтальній поверхні, що забезпечило коефіцієнт поглинання не менше 30 дБ/см/МГц. Але частина енергії ультразвуку відбивається від мішені вгору і перевипромінюється водною поверхнею вниз та попадає на мішень. Друга частина проходить через мішень вниз і відбивається від нижньої поверхні вимірювальної ємності, компенсуючи дію на мішень першої. Тому сумарний ефект можна вважати незначним.

Кінцеві розміри мішені призводять до зменшення радіаційної сили. Оскільки діаметр мішені перевищує півтора діаметра УзВ, то внесок у непевність оцінюють у $\pm 1\%$ [33].

Для поглинаючої мішені зануреної у дистильовану воду значення потужності 10 мВт – еквівалентне радіаційній силі в 6,7 мкН і масі 0,68 мг, тоді як значення потужності 10 Вт еквівалентне радіаційній силі 6,7 мН і масі 0,68 г [33]. При «зважуванні» радіаційної сили прецизійними вагами результат вимірювання отримуємо в одиницях маси. Для переходу в одиниці сили результат необхідно помножити на прискорення земного тяжіння.

При проведенні вимірювання потужності вище 1 Вт може спостерігатись значне підвищення температури води. Тому необхідно контролювати температуру води та мінімізувати час вимірювання, зокрема на високих рівнях потужності (до 60 В на вході УзВ) – протягом перших 25 с [102]. Відхилення температури від опорного значення на $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ приводить до непевності результату вимірювання потужності в межах $\pm 0,2\%$ [33].

Частота резонансу може змінюватися з плином часу, від зміни температури та під дією інших впливних факторів. Відносну зміну резонансної частоти δf під час калібрування УзВ можна оцінити в $\pm 0,5\%$ для УзВ з п'єзокерамічним чутливим елементом і $\pm 0,05\%$ – з монокристалічним чутливим елементом [110].

За результатами дослідження встановлено [110], що відносне зміщення резонансної частоти δf викликає зміну потужності випромінюваного ультразвуку не більше ніж на 0,5 %, якщо $\delta f \leq \delta f_0$,

де δf_0 – визначають як:

$$-5 \cdot 10^{-3} \cdot f_{RP} \leq \delta f_0 \leq 5 \cdot 10^{-3} \cdot f_{RP} \quad - \text{ для УзВ з п'єзокерамічним чутливим}$$

елементом;

$$-5 \cdot 10^{-4} \cdot f_{RP} \leq \delta f_0 \leq 5 \cdot 10^{-4} \cdot f_{RP} \quad - \text{ для УзВ з монокристалічним чутливим}$$

елементом.

Якщо $\delta f > \delta f_0$, то відносна зміна потужності δP дорівнює: $\delta P = -[\beta + \gamma(\delta f - \delta f_0)]$, %; де $\beta = 0,5$ % і $\gamma = 7,3$ – для УзВ з п'єзокерамічним чутливим елементом і $\beta = 0,05$ % і $\gamma = 80$ – з монокристалічним чутливим елементом.

Розрахункова формула (2.16), що пов'язує потужність ультразвукового випромінювання з радіаційною силою, одержана за певних припущень, а саме теоретичне рішення одержано в наближенні плоских хвиль, та вважається, що відсутнє поглинання енергії середовищем, вся енергія поглинається мішенню, відсутня інтерференція і акустичні течії, повітряні пухирці, температурний дрейф УзВ, врахування якого вимагає екстраполяції результатів вимірювання назад до моменту включення випромінювання. Недосконалість теорії призводить до методичної складової у сумарній непевності, яку оцінено на підставі експериментальних досліджень у ± 2 %

Напруга V_{ex} змінюється під час вимірювання потужності, крім того, встановити однакову початкову напругу для кожного вимірювання серії з 10 спостережень неможливо через особливості підсилювача потужності. Тому для врахування зміни потужності від зміни напруги у математичну модель необхідно ввести коригувальний коефіцієнт K_V , який дорівнює квадрату відношення опорного значення V_0 до фактичної напруги V на вході УзВ:

$$K_v = \left(\frac{V_0}{V} \right)^2. \quad (2.23)$$

Зупинившись на варіанті з абсорбуючою мішенню, врахувавши, що радіаційна сила F , що діє на мішень, еквівалентна масі m , виміряній за допомогою ваги; коригувальний коефіцієнт вимірювання електричної напруга на вході УзВ; поправки на зміщення резонансної частоти, на відхилення температури від опорного значення, на недосконалість мішені та вимірювальної ємності; методичну поправку була уточнена формула (2.16) математичної моделі вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку, випромінюваного у водне середовище:

$$W = c \cdot m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) \left(1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka) \right)^{-1} \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M); \quad (2.24)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \lambda = \frac{c}{f}; \quad (2.25)$$

$$\Pi_T = \alpha \cdot \Delta T; \quad (2.26)$$

$$\Pi_R = \begin{cases} \pm [\beta + \gamma(\mathcal{F} - \mathcal{F}_0)], & \text{якщо } \mathcal{F} > \mathcal{F}_0; \\ \pm \beta, & \text{якщо } \mathcal{F} \leq \mathcal{F}_0; \end{cases} \quad (2.27)$$

де W – потужність випромінюваного ультразвуку;

c – швидкість звуку у воді;

m – маса (покази терезів 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;

P_R, P_T, P_H, P_M – поправки відповідно: на зміщення резонансної частоти, на відхилення температури від опорного значення, на недосконалість мішені та вимірювальної ємності, методична поправка;

λ - довжина акустичної хвилі;

f – частота збуджуючого сигналу;

ΔT – відхилення температури від опорного значення;

δf – відносне зміщення резонансної частоти;

α, β, γ - сталі:

$\beta = 0,5 \%$ і $\gamma = 7,3$ – для УзВ з п'єзокерамічним чутливим елементом і

$\beta = 0,05 \%$ і $\gamma = 80$ – для УзВ з монокристалічним чутливим елементом;

$\alpha = \pm 0,2 \%$.

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

Проведений аналіз не виявив суттєвої кореляції між вхідними величинами за виключенням кореляції між вимірюваною і опорною напругою, які вимірюють одним і тим же вольтметром, коефіцієнт кореляції у такому випадку взято рівними 0,8. Якщо за опорне значення напруги взяти середнє значення всіх вимірюваних напруг на вході УзВ для кожної серії спостережень, коефіцієнт кореляції буде рівним нулю.

2.4 Математична модель процесу випромінювання акустичної потужності ультразвуковим випромінювачем

УзВ є одним із основних складових еталона одиниці потужності ультразвуку. Він призначений для зберігання і передавання розміру одиниці потужності ультразвуку робочим засобам вимірювання з допомогою робочих еталонів, а також для проведення міжнародних звірень еталона. Щоб

досягнути передбачуваних метрологічних характеристик вибрано просту одноелементну конструкцію УзВ резонансного типу з дисковим п'єзоелектричним чутливим елементом і розроблено у двох модифікаціях:

- з монокристалічним диском з ніобату літія (рисунок 2.4);
- з п'єзокерамічним диском із кераміки типу ЦТС-19 (рисунок 2.5).

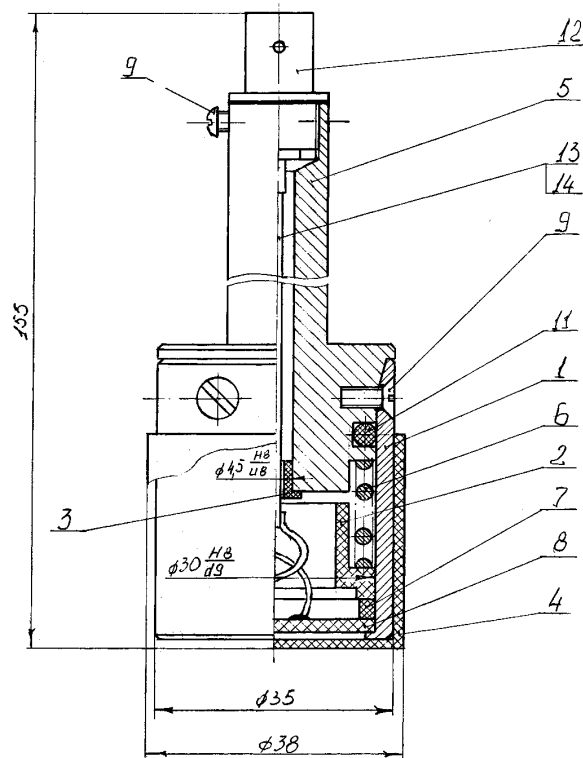


Рисунок 2.4 – Конструкція УзВ з монокристалічним чутливим елементом:

- 1- корпус;
- 2, 3 – втулка;
- 4 – ковпачок;
- 5 – хвостовик;
- 6 – пружина;
- 7 – прокладка;
- 8 – диск п'єзоелектричний;
- 9, 10 – гвинти;
- 11 – кільце;

- 12 – розетка кабельна;
- 13 – провід;
- 14 – трубка

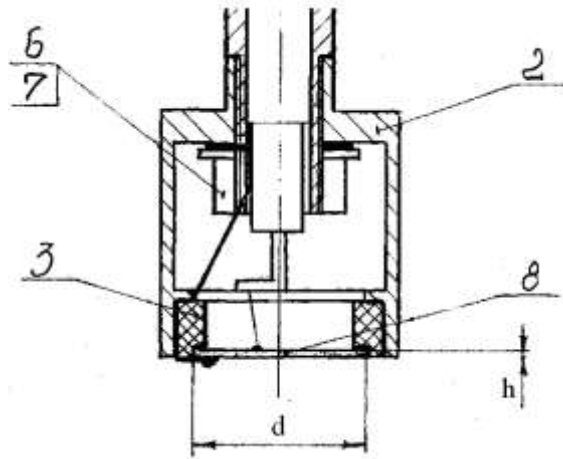


Рисунок 2.5 – Конструкція УзВ з п'єзокерамічним чутливим елементом:

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

УзВ з п'єзокерамічними дисками мають значно нижчу добротність порівняно з монокристаллами. Вони ефективно працюють лише на першій гармоніці. Для забезпечення заданого діапазону дискретних частот і потужностей розроблено і виготовлено комплект УзВ (рисунок 2.6) з різними розмірами дискових чутливих елементів, оскільки резонансна частота (товщинна мода) визначається його товщиною, а випромінювана ультразвукова потужність (за даного рівня напруги збуджуючого сигналу) – діаметром диску.



Рисунок 2.6 – Комплект УЗВ з п'єзокерамічними та п'єзоелектричними монокристалічними дисковими чутливими елементами:

1 – УЗВ з п'єзоелектричними монокристалічними дисковими чутливими елементами.

Фізична модель УЗВ

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

Розрахунок характеристик та параметрів УЗВ виконується в рамках певної фізичної моделі, яка визначається конструкцією випромінювача та чутливим елементом. Чутливий елемент еталонного УЗВ – тонкий п'єзокерамічний диск із кераміки ЦТС - 19, – вільно опирається по контуру на виточку в обоймі, куди він посаджений на клей-герметик (рисунок 2.5) і працює на п'єзожорсткій моді ДВр: вектор поляризації перпендикулярний до

площини диску, переміщення паралельне поляризації (резонансний розмір – товщина) (рисунок 2.7).

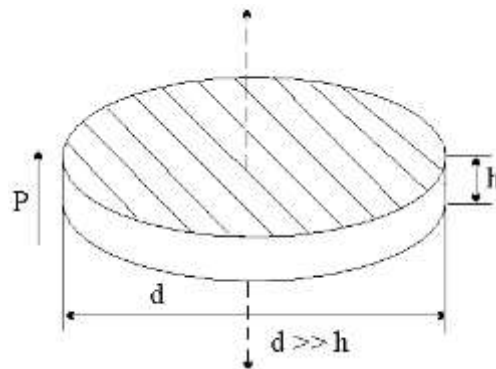


Рисунок 2.7 – Фізична модель УзВ. П'єзоелектричний дисковий чутливий елемент.

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

Математична модель

Процес генерування ультразвуку у п'єзокерамічному диску описують наступною системою рівнянь, яка містить рівняння стану п'єзокерамічного середовища, рівняння руху та рівняння вимушеної електростатики [82]:

Рівняння стану це залежність між механічними напруженнями, деформаціями і електричним полем в умовах однорідності їх в елементарному об'ємі [82-85]:

$$\sigma = c_{33}^E \frac{\partial u}{\partial z} - e_{33} E; \quad (2.28)$$

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

де u , σ – зміщення та напруження, що описують поле пружних деформацій;

D , E – індукція та напруженість електричного поля;

c_{33}^E , ε_{33}^s , e_{33} - пружні, діелектричні і п'єзоелектричні сталі, відповідно.

Рівняння руху в елементарному об'ємі для нашого випадку буде мати вигляд [82-85]:

$$\rho_n \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial z};$$

$$\frac{\partial D}{\partial z} = 0,$$
(2.29)

де ρ_n - густина п'єзокераміки;

t – час.

Рішення системи рівнянь (2.28) - (2.29) при трансверсально-ізотропній симетрії диска за рахунок його попередньої поляризації проводиться за граничних умов імпедансного типу [82-85]:

$$z = \pm l;$$

$$\sigma \pm z_a^\pm \frac{\partial u}{\partial t} = 0;$$
(2.30)

$$V_n Y_e + S \frac{\partial D}{\partial t} = 0,$$

де z_a^\pm - опір акустичного навантаження, яке прикладене до торців $z = \pm l$ активного елемента (диску) ($l = \frac{h}{2}$, де h – товщина);

Y_e - провідність електричного навантаження на активний елемент;

S – площа поверхні диску;

V_n - електрична напруга, прикладена до п'єзоелемента.

Тоді при гармонійній залежності шуканих величин від часу типу $\exp(i\omega t)$ розв'язок граничної задачі (2.28) - (2.30) має вигляд [82-85]:

$$-\sigma(l) = V_n \frac{e_{33}}{2l} \frac{\alpha_a^+}{1 + \alpha_a^+} \frac{(1-a)(1-av^-)}{\Delta_0 - \Delta_l}; \quad (2.31)$$

$$\alpha_a^\pm = \frac{z_a^\pm}{z_n}; \quad z_n = \sqrt{\rho_n c_{33}^D}; \quad v^\pm = \frac{1 - \alpha_a^\pm}{1 + \alpha_a^\pm}; \quad (2.32)$$

$$a = e^{-2ik_n l}; \quad k_n = \frac{\omega}{c_n}; \quad c_n = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho_n}}; \quad (2.33)$$

$$\Delta_0 = 1 - a^2 v^+ v^-; \quad (2.34)$$

$$\Delta_l = \frac{\beta}{4ik_n l} (1-a) [2 + v^+ + v^- - a(v^+ + v^- + 2v^+ v^-)], \quad (2.35)$$

де β - відповідне значення квадрата коефіцієнта електромеханічного зв'язку;

c_n - швидкість звуку у п'єзокераміці;

c_{33}^D - модуль пружності;

k_n - хвильове число для п'єзокераміки;

ω - кутова частота;

позначення решти величин відповідають позначенням у формулах (2.28)-(2.29).

З (2.30) можна одержати вираз для визначення акустичної потужності, випромінюваної УзВ у водне середовище [23]:

$$P_{ак} = \frac{1}{2} S_n \left| \frac{\sigma(l)}{z_a^+} \right|^2 \operatorname{Re} z_a^+, \quad (2.36)$$

де S_n - площа поверхні УзВ.

У числових розрахунках при навантаженні на півпростір, який має місце у нашому випадку використано наступний вираз для опору z_a^+ [82]:

$$z_a^+ = \rho c z_R; \quad z_R = \operatorname{Re} z_R + i \operatorname{Im} z_R; \quad (2.37)$$

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

$$\operatorname{Im} z_R = 9,158(ka)^{-3,415};$$

$$k = \frac{\omega}{c}$$

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

На частоті механічного резонансу, якщо знехтувати опором механічних втрат, можна отримати спрощений варіант формули (2.31) для визначення акустичної потужності [23]:

$$W_s = V_n^2 \frac{a^2}{h^2} \cdot \frac{2\pi d_{33}^2}{\rho c s_{33}^2}, \quad (2.38)$$

де V_n - електрична напруга на п'єзоелементі;

a - радіус диску;

h - товщина;

ρ - густина середовища;

c - швидкість звуку в середовищі;

d_{33} - п'єзоелектричний модуль;

s_{33} - пружна податливість п'єзокераміки.

Для УзВ основним параметром є його електроакустична провідність [46, 103], яка залежить від електрофізичних властивостей матеріалу п'єзодиска, його розмірів та акустичної жорсткості середовища (дистильованої води), у яке випромінюється ультразвук:

$$G = \frac{W_g}{V_n^2} = \frac{a^2}{h^2} \cdot \frac{2\pi d_{33}^2}{\rho c s_{33}^2} \quad (2.39)$$

Формули (2.38) та (2.39) далі використовуються як модельна функція для числових розрахунків при експериментальних дослідженнях еталона одиниці потужності ультразвуку.

2.5 Висновки до розділу 2

У другому розділі:

- викладено особливості процесу випромінювання ультразвуку та проведено теоретичні дослідження особливостей поширення його у водному середовищі;
- подано основні рівняння, які описують акустичний радіаційний тиск;
- удосконалено математичну модель вимірювання під час відтворення одиниці потужності ультразвуку, випромінюваного у водне середовище;
- подано математичну модель процесу випромінювання акустичної потужності ультразвуковим випромінювачем.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [56, 57, 105].

РОЗДІЛ 3

АДАПТИВНИЙ МЕТОД СТВОРЕННЯ ЕТАЛОНІВ ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ

Запропоновано адаптивний метод створення еталонів одиниць вимірюваних величин із заданими характеристиками точності за умови обмежених ресурсів.

Початковими даними задачі є:

- перший варіант математичної моделі процедури вимірювання при відтворенні, зберіганні та передаванні одиниці вимірювання, розробленої на основі фізичної моделі, яка, у свою чергу, побудована відповідно до апріорної інформації щодо принципу відтворення (зберігання та передавання) одиниці вимірювання, переліку інформативних параметрів і впливових величин при вимірюванні;

- необхідні характеристик точності, задані технічним завданням;
- ресурси, виділені на створення еталона.

Необхідно отримати: метод побудови еталонів одиниць вимірювання, що передбачає адаптивний спосіб розроблення структурної, функціональної та принципівих схем еталона, конструкції окремих складових і еталона в цілому та алгоритму управління процесом вимірювання і оброблення вимірювальної інформації в умовах обмежених ресурсів.

3.1 Удосконалення методики мінімізації непевності

Методика мінімізації непевності - метод PUMA (Procedure for Uncertainty Management), як відомо [86, 89, 90], призначений для оцінювання непевності при вимірюванні геометричних параметрів продукції. Метод PUMA – це практичний, ітераційний метод оцінки і подання непевності у

вимірюванні. Ітераційний метод базується на стратегії верхньої границі, тобто на переоцінюванні непевності на усіх рівнях, але при ітераційному контролі результату переоцінки. Необхідною умовою при розробленні бюджету та управлінні непевністю є чітко встановлена та визначена вимірювальна задача. У [86, 89] розглядається методика мінімізації непевності для заданого та такого, що розробляється, вимірювальних процесів. Детальний опис реалізації метода PUMA для цих вимірювальних процесів подано в [86, 89, 90]. На рисунку 3.1 [90] подано блок-схему методики мінімізації непевності для вимірювального процесу, що розробляється.

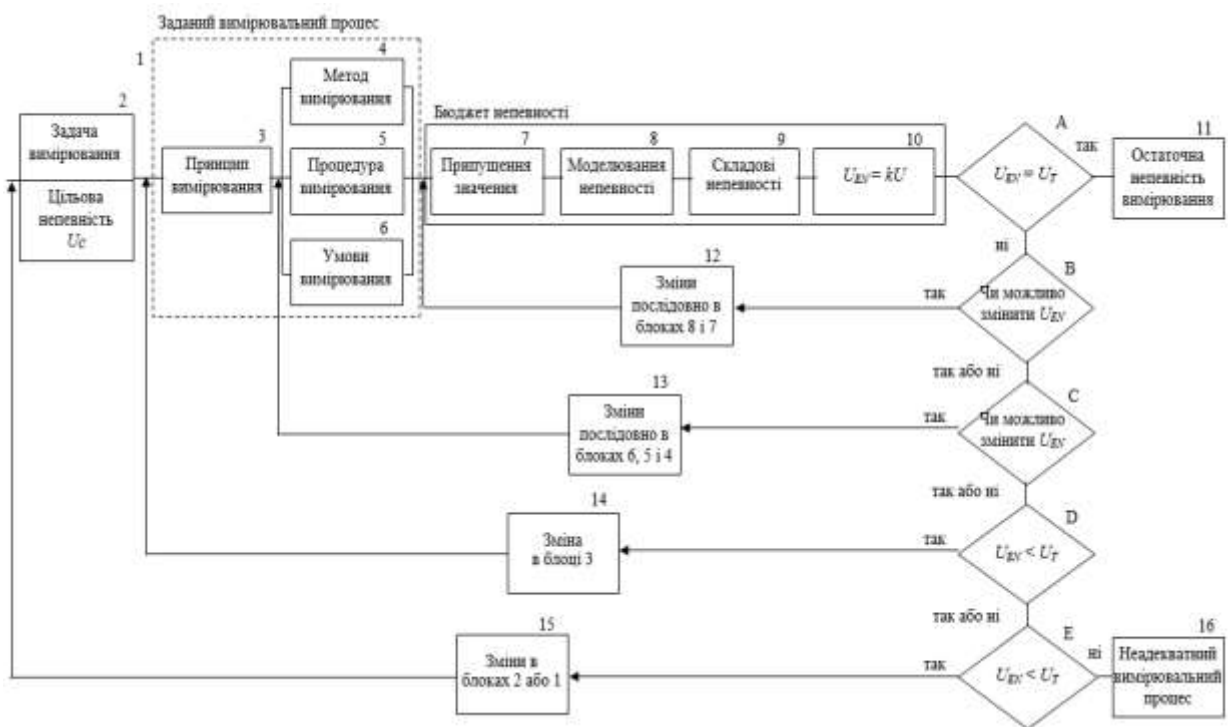


Рисунок 3.1 – Блок-схема методики мінімізації непевності для вимірювального процесу, що розробляється:

U_C – дійсна (розрахована за [112]) розширена непевність;

U_{EN} – приблизна розширена непевність, оцінена спрощеним ітераційним методом з кількістю ітерацій N ;

U_T – цільова розширена непевність, оптимальна для даної вимірювальної задачі.

На першій ітерації модельне рівняння, як правило, будують на основі методу чорного ящика («black box») [86, 89, 90], який передбачає запис модельного рівняння у наступному вигляді:

$$Y = X + \sum_{i=1}^{m+q} C_i, \quad (3.1)$$

де Y – вимірювана величина;

X – покази вимірювального приладу;

C_i – i -адитивна поправка на відому (невиключену) систематичну похибку (похибку калібрування, температурну похибку, похибку через деформацію і т.д.);

m, q – відповідно кількість некорельованих і корельованих джерел непевності.

З поступовим уточнення модельного рівняння застосовують метод прозорого ящика («transparent box») запису модельного рівняння (звичайний запис через функцію зв'язку [112, 113]). З часом модельне рівняння ускладнюється, може ставати суттєво нелінійним, аналітичний спосіб оцінки непевності стає принципово непридатним [91-95], зокрема обчислення коефіцієнтів чутливості, як частинних похідних стає складним, а іноді нерозв'язним завданням. Тому метод PUMA був вдосконалений: замість методу прозорого ящика (аналітичного способу) були запроваджені цифрові методи – метод числового диференціювання і/або метод імітаційного моделювання (метод Монте-Карло (МСМ) [96]).

Для удосконаленого метода PUMA бюджет непевності складають за **алгоритмом** [87, 88]:

Крок 1. Визначаються номінальні значення та характеристики точності вхідних величин.

Крок 2. Визначаються закон розподілу вхідних величин і обчислюють стандартні непевності вхідних величин $u(x_k)$:

$$u(x_k) = a_k \cdot b, \quad (3.1)$$

де a_k – відомі границі НСП (характеристики точності) k -ої вхідної величини;
 b – коефіцієнт розподілу, який характеризує закон розподілу похибки в середині цих границь:

$b = 0,5$ для нормального розподілу (розподіл Гауса);

$b = 0,6$ для рівномірного розподілу;

$b = 0,7$ для U-розподілу (арксинусний розподіл).

Якщо закон розподілу НСП невідомий, тоді необхідно вибирати U-розподіл (з найбільшим b).

Крок 3. На перших ітераціях, коли модельне рівняння знаходиться з поєднання методів чорного ящика і прозорого ящика обчислюють коефіцієнти чутливості c_k .

При обчисленні коефіцієнтів чутливості використовують:

- для вхідних величин, які явно входять до модельної функції, знаходять частинні похідні;

- для вхідних величин, які явно не входять в модельну функцію, але їх внесок суттєво впливає на кінцевий результат, застосовувався метод так званого чорного ящика. Поправки на відому систематичну похибку цих вхідних величин адитивно додаються до модельної функції. Коефіцієнти чутливості при цьому приймаються рівними одиниці.

На наступних ітераціях, коли модельне рівняння ускладнюється коефіцієнти чутливості c_k для вхідних величин, які нелінійно входять у модельне рівняння, не обчислюють.

Крок 4. Джерела непевності слабо корельовані між собою розглядаються як некорельовані (коефіцієнт кореляції $r = 0$); для сильно корельованих коефіцієнт кореляції береться рівним +1 або -1 залежно від характеру зв'язку.

Крок 5. Обчислюється внесок кожної вхідної величини $u_k(y)$ в сумарну стандартну непевність:

- на перших ітераціях

$$u_k(y) = c_k \cdot u(x_k), \quad (3.2)$$

де $u(x_k)$ – стандартна непевність k -ої вхідної величини;

c_k – коефіцієнт чутливості k -ої вхідної величини.

- на наступних ітераціях методом числового диференціювання внесок $u_k(y)$ розраховують як частинні прирости модельної функції Δf_k при відхиленні значення x_k від номінального.

$$u_k(y) = \Delta f_k = f(x_k)^+ - f(x_0), \quad (3.3)$$

де $f(x_0)$ – значення функції при номінальних значеннях всіх вхідних величин у вибраній точці простору параметрів;

$f(x_k)^+$ – значення функції при номінальних значеннях вхідних величин, за виключенням однієї, k -ї вхідної величини, яка підставляється з відхиленням від номінального значення на величину стандартної непевності.

Крок 6. Сумарна стандартна непевність u_c обчислюється за формулами:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2, \quad (3.4)$$

де u_A – стандартна непевність, яка розраховується за типом А;

u_B – стандартна непевність, яку розраховують за типом В: некорельовані ($r = 0$) складові додаються геометрично, а сильно корельовані ($r = +1$ або $r = -1$) складові – арифметично:

$$u_B^2 = u_q^2 + \sum_{k=1}^m u_k^2(y), \quad (3.5)$$

де $u_k(y)$ – вклад k -ої вхідної величини в сумарну стандартну непевність;

m – число некорельованих джерел непевності;

u_q – сума сильно корельованих складових непевності:

$$u_q = \sum_{k=1}^q u_k(y), \quad (3.6)$$

де q – число сильно корельованих складових.

$$u_A = S_{\bar{x}}, \quad (3.7)$$

де $S_{\bar{x}}$ – СКВ результату вимірювання при передаванні одиниці потужності.

Крок 7. Обчислюється розширена непевність U (при коефіцієнті розширення $k = 2$).

$$U = k \cdot u_c, \quad (3.8)$$

де u_c – сумарна стандартна непевність.

Крок 8. Обчислюються частку внеску для аналізу внесків стандартної непевності вхідних величин у розширену непевність, які дозволяють виявити ті джерела непевності, що вносять найбільший вклад у сумарну непевність вихідної величини і зменшення яких приносить найбільший ефект:

$$\zeta = \frac{u_k^2(y)}{u_c^2} \quad (3.9)$$

де $u_k(y)$ – вклад k -ої вхідної величини в сумарну стандартну непевність;

u_c – сумарна стандартна непевність.

Крок 9. Результати розрахунків зводяться у загальну таблицю – бюджет непевності.

Для обчислення сумарної стандартної непевності та розширеної непевності, якщо модельне рівняння суттєво нелінійне або проведення вимірювання вимагає багато часу, можна використовувати метод Монте-Карло [96], застосування якого докладніше розглянуто в підпункті 4.2.2.

Для вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі метод PUMA було вперше застосовано на початковій стадії його створення [87, 88] 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 [86, 89, 90].

Оскільки, у процесі створення еталона враховували все більше факторів і їх функціональних зв'язків, що впливають на кінцевий результат, модельне рівняння уточнювалось і ускладнювалось, ставало нелінійним, тому для подальших розрахунків було застосовано удосконалений метод PUMA.

3.2. Адаптивний метод створення еталонів одиниць вимірювання

Адаптивний метод ґрунтується на принципах інформаційних технологій – імітаційному моделюванні, числовому диференціюванні в поєднанні з теоретичними і експериментальними дослідженнями і застосовується на всіх стадіях побудови еталона. Він базується на ітераційному уточненні адекватного модельного рівняння (математичної моделі вимірювання) у міру накопичення в процесі розроблення еталона вимірювальної інформації і застосованому тут удосконаленому методі PUMA оцінки непевності. Адаптивний метод направлений на досягнення найвищої

точності при мінімальних затратах. Максимально допустимі витрати на створення еталона і мінімально допустима точність є обмежувачими факторами.

Сукупність розроблених і використаних методів, об'єднаних у технологічний ланцюжок, що забезпечує побудову еталонів одиниць вимірювання подано на рисунку 3.2 [97-99].

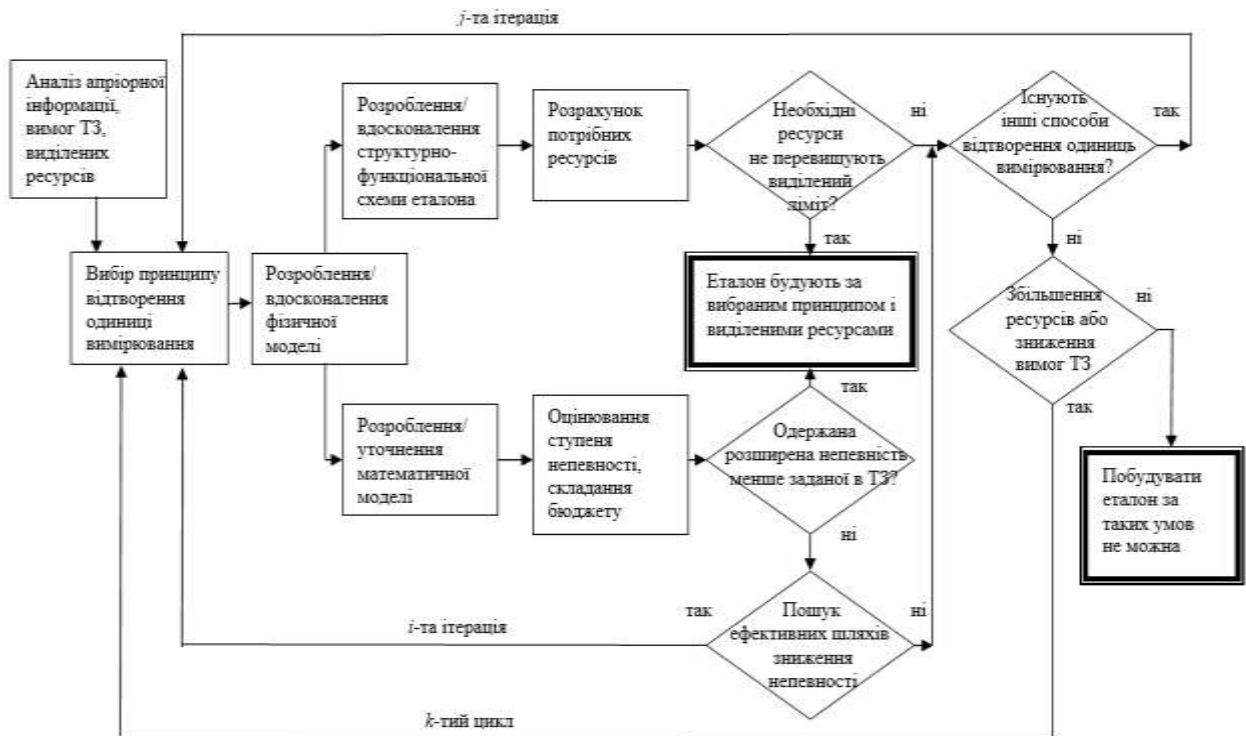


Рисунок 3.2 – Структурно-функціональна схема адаптивного методу створення еталонів одиниць вимірювання за обмежених ресурсів

Запропонований адаптивний метод реалізують у кілька ітерацій [97-99].

На 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;

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 бюджет непевності. Для наочності бюджет непевності подають крім того, у вигляді гістограми часток внесків джерел непевності у сумарну непевність.

Паралельно розробляють спрощену структурно-функціональну схему еталона та оцінюють на її основі 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 підвищенню характеристик точності майбутнього еталона.

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

На другій ітерації та, за необхідності, на третій і наступних ітераціях:

а) проводять аналіз результатів розрахунків, виконаних на першій ітерації, встановлюють джерела, які вносять найбільший вклад у сумарну 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 та оцінюють потрібні ресурси;

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

г) оцінюють ступінь непевності у вимірюванні удосконаленим методом PUMA.

Відповідно до уточненої математичної моделі і попередньо вибраної структурної схеми аналізують всі можливі додаткові джерела непевності, збирають і аналізують всю доступну апріорну інформацію щодо характеристик точності інформативних параметрів і впливних величин, і складають перелік вхідних величин. Використовують різні джерела інформації: технічну документацію на прилади, довідники, міжнародні стандарти і нормативні документи, звіти про міжнародні звірення, технічну літературу і т.п. Характеристики точності вхідних величин приводять до єдиної форми – до стандартної непевності.

На основі розрахунків складають у формі таблиці бюджет непевності, кінцевим результатом якого є розширена непевність у вимірюванні (за попередньо вибраною структурною схемою еталона) та долі вкладів кожного з її джерел у сумарну непевність вихідної величини. Для наочності бюджет непевності подають крім того, у вигляді гістограми часток внесків джерел непевності у сумарну непевність.

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.

Слід відзначити, що при зниженні домінуючих джерел непевності після чергової ітерації за рахунок раціональніших схемо-технічних і конструктивних рішень на наступних ітераціях більшу вагу, більшу долю вкладу набувають і стають домінуючими інші джерела непевності. Тому найефективнішими будуть заходи направлені на зменшення впливу домінуючих джерел, які виявлені на попередній ітерації. Запропонований

адаптивний метод дає можливість знаходити оптимальні рішення у таких ситуаціях.

Якщо на 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.

3.2. Проектування еталона з використанням адаптивного методу

Розроблення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі проводили відповідно до запропонованого адаптивного методу [99-101].

1. Перша ітерація.

а) аналіз апріорної інформації та вибір принципу відтворення одиниці вимірювання

На основі зібраної інформації, для реалізації в еталоні одиниці потужності ультразвуку у воді вибрано метод балансу радіаційного тиску з використанням прецизійної електронної ваги, рекомендований міжнародним стандартом ІЕС 61161 [33].

б) фізична модель

На рисунку 3.3 подано спрощену фізичну модель вимірювання ультразвукової потужності у водному середовищі методом балансу сил.

Ультразвуковий випромінювач 1 занурений у дистильовану воду в ємності 3, активується від генератора електричних сигналів у діапазоні мегагерцових частот і випромінює ультразвуковий промінь, який, взаємодіючи з мішенню 2, і створює радіаційну силу F . Радіаційна сила з

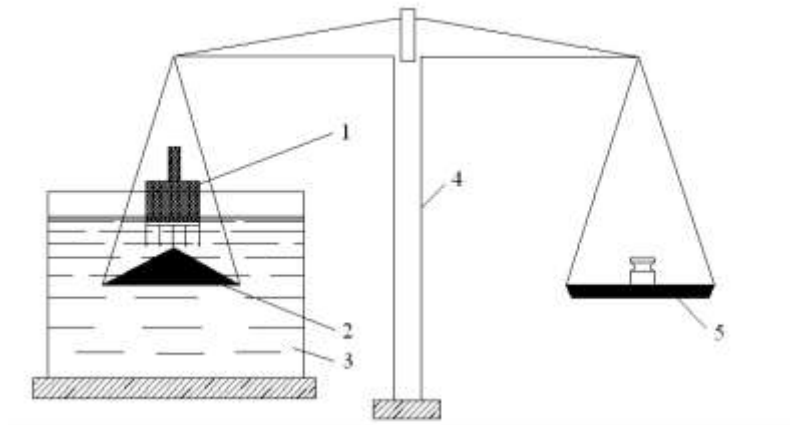


Рисунок 3.3 – Фізична модель вимірювання ультразвукової потужності у водному середовищі методом балансу сил. Перша ітерація:

- 1 – ультразвуковий випромінювач;
- 2 – конічна мішень;
- 3 – ємність з дистильованою водою;
- 4 – вага;
- 5 – чашка з різноважками.

мішені через підвіски передається на вагу 4, де на чашці 5 з допомогою різноважка визначається її значення.

На першій ітерації розглядали спрощений варіант структури еталона, який включав лише генератор, підсилювач потужності, ультразвуковий випромінювач, ємність з мішенню, вагу III класу і систему водопідготування. Вартість створення такого еталона мінімальна.

в) математична модель

Прийняли за математичну модель процесу вимірювання співвідношення (2.14) та (2.15).

г) оцінювання непевності удосконаленням методом PUMA

Відповідно до математичної моделі і попередньо вибраної структурної схеми проаналізували всі можливі джерела непевності, зібрали і проаналізували всю доступну інформацію щодо характеристик точності вхідних величин (інформативних параметрів і впливових величин) і

складають таблицю (перелік) вхідних величин. Як приклад наведено таблицю вхідних величин для вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку (таблиці 3.1). Характеристики точності привели до єдиної форми – до стандартної непевності.

Таблиця 3.1 – Найменування, позначення та одиниці вимірювання вхідних величин

Вхідна величина	Позначення	Одиниці вимірювання
Частота	f	МГц
Швидкість звуку у воді	c	м/с
Кут між напрямом поширення акустичної хвилі і нормаллю відбиваючої (конічної опуклої) поверхні ¹	ϑ	градус
Радіус ультразвукового випромінювача	a	мм
Густина рідини (дистильована вода)	ρ	кг/м ³
Температура	t	°С
Радіус мішені	b	мм
Не центрованість ультразвукового променя і мішені, не перпендикулярність	S_p	%
Сила ваги (маса, яка еквівалентна радіаційній силі)	F_g	г
Напруга на ультразвуковому випромінювачі	V	В

¹ Тільки для випадку відбиваючої мішені

На основі розрахунків склали у формі таблиці бюджет непевності першої ітерації, кінцевим результатом якого є розширена непевність у вимірюванні за попередньо вибраною структурною схемою еталона та частки внеску кожного із джерел непевності у сумарну непевність вихідної величини.

Закон розподілу вхідних величин приймали рівномірним для всіх величин за виключенням СКВ випадкової похибки [89, 90, 87]. СКВ випадкової похибки має нормальний закон розподілу.

При аналізі зв'язків між вхідними величинами не було виявлено істотної кореляції тому всі джерела непевності приймали некорельованими.

У таблиці 3.2 подано приклад бюджету непевності для потужності 0,005 Вт на частоті 5 МГц. При побудові таблиці використали різні джерела інформації про характеристики точності вхідних величин (технічна документація на прилади, довідники, міжнародні стандарти, зокрема ІЕС 61161, звіти про міжнародні звірення, технічна література).

Таблиця 3.2 – Бюджет непевності першої ітерації (частота 5 МГц, потужність 0,005 Вт)

Вхідні величини					Вихідні величини	
Позначення величини	Номинальне значення	Характеристики точності (відхилення), %	Коефіцієнти чутливості	Стандартна непевність, $u(x_k)$, %	Внесок, $u_k(y)$, %	Частка внеску, %
f^1	5,00	$0,20 \cdot 10^{-5}$	1,00	0,00	0,00	0,00
c^1	1491,5	0,000070	1,00	0,00	0,00	0,00
g^1	45,00	3,50	1,49	2,02	3,01	2,36
a^2	13,50	3,70	0,00	2,14	0,00	0,00
ρ^2	$997,54 \cdot 10^{-3}$	$0,10 \cdot 10^{-4}$	1,00	0,00	0,00	0,00
t^2	23,00	0,20	1,00	0,12	0,12	0,00
b^2	41,00	2,00	1,00	1,15	1,15	0,34
S_p^2	3,00	3,00	1,00	1,73	1,73	0,78
F_e^1	$34,13 \cdot 10^{-5}$	29,30	1,00	16,92	16,92	74,32
V^2	var	4,00	2,00	2,31	4,62	5,54
СКВ ³		8,00	1,00	8,00	8,00	16,61
Сумарна стандартна непевність u_c , %					19,62	
Розширена непевність U , % ($k=2$)					39,25	

¹ Коефіцієнти чутливості шукають як частинні похідні

² Використовували метод чорного ящика

³ Нормальний закон розподілу

Перша ітерація досить груба, виконували на основі спрощеної математичної моделі з метою попередньої оцінки розширеної непевності та співставлення її з вимогами ТЗ на створення еталона, а також з метою виявлення домінуючих складових непевності. У нашому випадку розширена

непевність на першій ітерації склала приблизно 39 % і виявилася значно більшою за ту, яка задана у ТЗ.

При даній фізичній моделі ресурси необхідні на створення еталона не перевищили виділений ліміт (див. додаток А).

д) прийняття рішення щодо напрямку подальшої роботи над створенням еталона

Шукали шляхи зменшення розширеної непевності і проводили другу ітерацію.

2. Друга ітерація.

а) аналізування бюджету непевності та пошук шляхів зменшення непевності вхідних величин

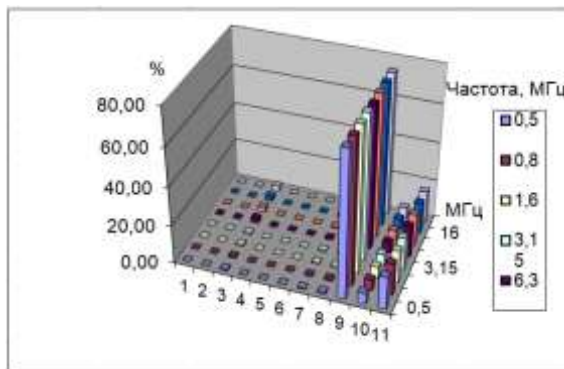
Аналіз результатів першої ітерації показав, що домінуючими складовими були неточність терезів III класу, розширена непевність у вимірюванні яких становила 17 % та випадкова складова, яка досягала 8 % (рисунок 3.4 а).

Отже, 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 і облаштуванні приміщення, де розташовували еталон, що дозволило знизити випадкову складову похибки вимірювання в два рази.

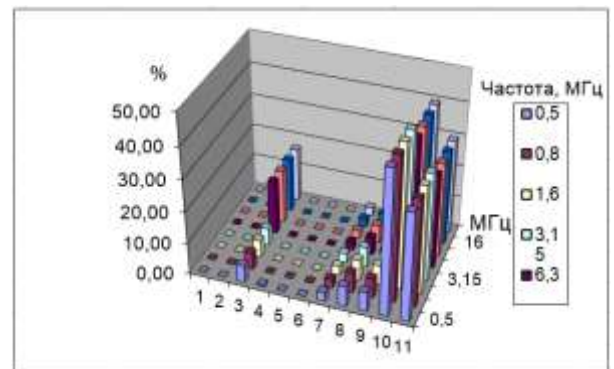
б) удосконалення фізичної моделі

Удосконалену фізичну модель вимірювання ультразвукової потужності у водному середовищі методом балансу сил розглядали відповідно до поданої на рисунку 1.6.

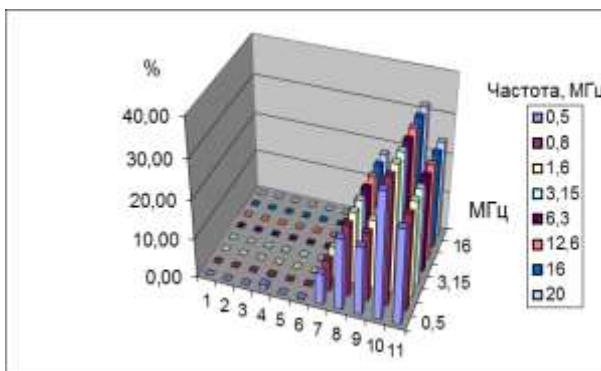
Відповідно до уточненої фізичної моделі розробили нову структурно-функціональну схему. До структурно-функціональної схеми еталона ввели вагу 1 класу, систему захисту від акустичних завад і вібрацій, вольтметр для контролю стабільності напруги на вході ультразвукового випромінювача, термометр для контролю зміни температури води (рисунок 3.5).



а) перша ітерація



б) друга ітерація



в) третя ітерація

Рисунок 3.4 – Гістограма часток внесків ξ джерел непевності залежно від частоти при потужності 5 мВт:

На осі абсцис подані джерела непевності:

- 1 – частота;
- 2 – швидкість звуку у воді;
- 3 - кут між напрямом поширення акустичної хвилі і нормаллю відбиваючої (конічної опуклої) поверхні;
- 4 – радіус ультразвукового випромінювача;
- 5 – густина дистильованої води;
- 6 – температура;
- 7 - радіус мішені;
- 8 – не центрованість ультразвукового променя і мішені, не перпендикулярність;
- 9 – маса, яка еквівалентна радіаційній силі;

10 - напруга на електроакустичному перетворювачі;

11 – СКВ випадкової непевності.

По осі ординат відкладена робоча частота.

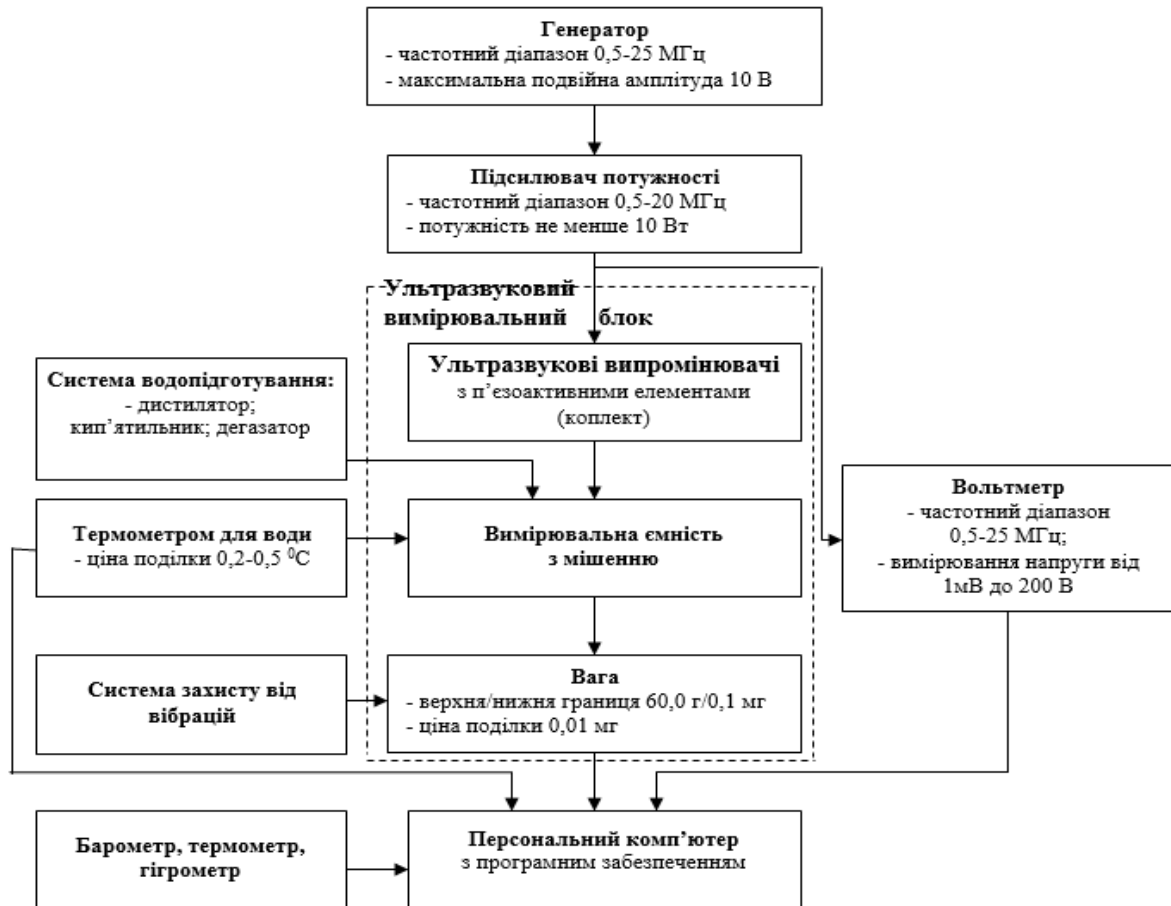


Рисунок 3.5 – Структурна схема вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку. Друга ітерація

в) уточнення математичної моделі

Формули (2.14) і (2.15) наближені, їх використовують тільки при робочих вимірюваннях, тому за уточнену математичну модель процесу вимірювання прийняли (2.16) - (2.18).

г) порядок оцінювання непевності вдосконалим методом PUMA

Для обчислення вкладу радіуса ультразвукового випромінювача $u_4(y)$ у сумарну стандартну непевність використали метод числового диференціювання за формулою (3.3).

У таблиці 3.3 подано приклад бюджету непевності для потужності 0,005 Вт на частоті 5 МГц. Крім того, для наочності подано у вигляді гістограми (рисунок 3.4 б) долі вкладів джерел непевності.

Таблиця 3.3 – Бюджет непевності другої ітерації (частота 5 МГц, потужність 0,005 Вт)

Вхідні величини					Вихідні величини	
Позначення величини	Номинальне значення	Характеристики точності (відхилення), %	Коефіцієнти чутливості	Стандартна непевність, $u(x_k)$, %	Внесок, $u_k(y)$, %	Частка внеску, %
f^1	5,00	$0,20 \cdot 10^{-5}$	1,00	0,00	0,00	0,00
c^1	1491,5	0,000070	1,00	0,00	0,00	0,00
g^1	45,00	3,50	0,79	2,02	1,59	5,35
a^2	13,50	3,70	0,01	2,14	0,00	0,00
ρ^3	$997,54 \cdot 10^{-3}$	$0, 10 \cdot 10^{-4}$	1,00	0,00	0,00	0,00
t^3	23,00	0,20	1,00	0,12	0,12	0,03
b^3	41,00	2,00	1,00	1,15	1,15	2,81
S_p^3	3,00	3,00	1,00	1,73	1,73	6,36
F_e^1	$34,13 \cdot 10^{-5}$	29,30	1,00	16,92	1,69	6,07
V^4	var	4,00	2,00	2,31	4,62	45,37
СКВ ³		8,00	1,00	8,00	4,00	34,01
Сумарна стандартна непевність u_c , %					7,33	
Розширена непевність U , % ($k=2$)					13,72	

¹ Коефіцієнти чутливості шукають як частинні похідні

² Використовували метод числового диференціювання

³ Використовували метод чорного ящика

⁴ Нормальний закон розподілу

За результатами другої ітерації одержана розширена непевність лише в деяких піддіапазонах вимірювання незначно перевищила задану у ТЗ.

Ресурси необхідні на створення еталона не перевищили виділений ліміт (див. додаток А).

д) прийняття рішення щодо напрямку подальшої роботи над створенням еталона

Прийняли рішення щодо підвищення точності так, щоб задовольнити вимоги ТЗ у всьому діапазоні частот та потужностей і виконали наступну ітерацію.

3. Третя ітерація.

а) аналізування бюджету непевності та пошук шляхів зменшення непевності вхідних величин

Домінуючими складовими були СКВ випадкової похибки та непевність у вимірюванні напруги на вході УзВ (рисунок 3.4 б). Для подальшого зниження 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. Алгоритм управління процесом вимірювання і оброблення вимірювальної інформації будували так, щоб максимально зменшити випадкову складову похибки, наприклад, за рахунок використання адаптивного способу набору числа спостережень при вимірюванні та інше. Для зменшення внеску похибки вимірювання напруги вибрали вольтметр з вищими характеристиками точності.

б) вдосконалення фізичної моделі

На третій ітерації у структурній схемі еталона передбачили вдосконалення програмного забезпечення та ефективнішу система захисту від зовнішніх впливів, які зменшили випадкову складову похибки до 2%. Крім того використали вольтметр з граничною допустимою похибкою не більше 2 %, а також осцилограф і частотомір для визначення та контролю параметрів сигналу на вході ультразвукового випромінювача та барометр, термометр, гігрометр – для вимірювання параметрів довкілля [104]. Мішень вибрали абсорбуючого типу.

в) уточнення математичної моделі

За математичну модель прийняли формули (2.24) – (2.27).

Крім того, ключові звірення національних еталонів одиниці ультразвукової потужності [46, 102, 103], які були проведені під контролем Міжнародного Комітету Мір і Ваги, показали, що для еталонів вищого рангу важливіше відтворювати не одиницю потужності, а електроакустичну провідність УзВ G :

$$G = \frac{W_{out}}{V_{in}^2}, \quad (3.10)$$

де W_{out} – вихідна ультразвукова потужність;

V_{in} – діюче значення напруги на вході УзВ.

г) порядок оцінювання непевності вдосконаленим методом PUMA

Порядок оцінювання непевності аналогічний порядку поданому на другій ітерації.

На третій ітерації розширена непевність не перевищила 10 % (рисунок 3.4 в), що задовольнило вимоги ТЗ. Загальні витрати на створення такого еталона знаходилися в межах передбаченого ліміту (див. додаток А).

Слід відзначити, що при зниженні домінуючих джерел непевності, більшу вагу, більшу долю вкладу набули і стали домінуючими і інші джерела непевності, наприклад, не центрованість ультразвукового поля і мішені, не перпендикулярність. Ці нові домінуючі джерела також контролювали. Тому в конструкції вимірювача потужності еталона забезпечували необхідну точність позиціювання ультразвукового випромінювача і розміри мішені.

д) прийняття рішення

Відповідно до зазначеного вище вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі було створено.

При розробленні конструкції еталона, програмного забезпечення та обладнанні приміщення, де розташовували еталон, реалізували заходи, які були перелічені вище.

3.3 Структурно-функціональна схема еталона

Структурно-функціональну схему вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі, розроблену адаптивним методом, подано на рисунку 3.6 [56, 99].

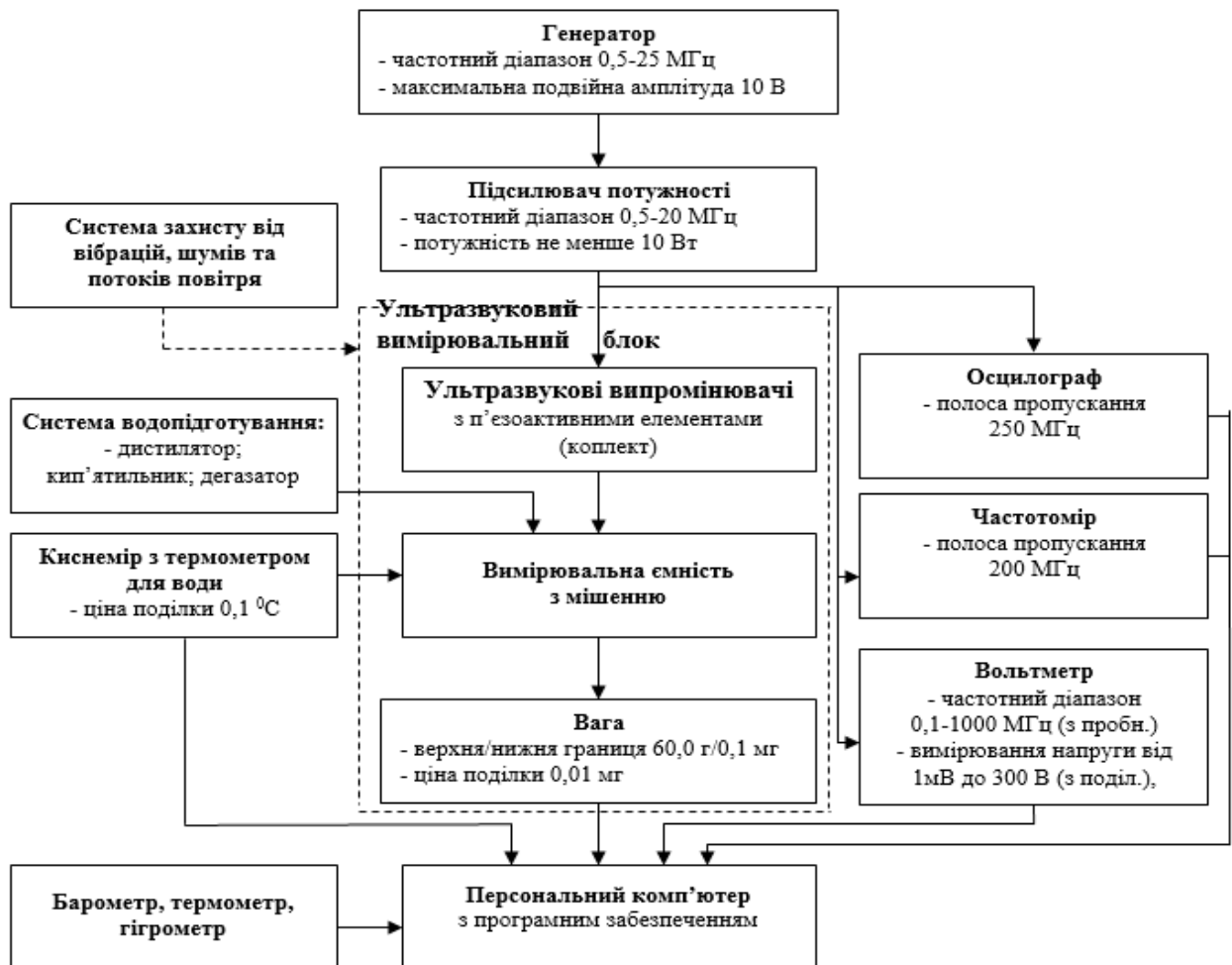


Рисунок 3.6 – Структурно-функціональна схема еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі

Від генератора через підсилювач потужності електричний гармонічний сигнал заданого рівня подається на ультразвуковий випромінювач на частоті його резонансу. Ультразвуковий випромінювач, занурений у дистильовану і дегазовану воду у вимірювальній ємності, створює ультразвуковий промінь, який взаємодіє з мішенню. Значення радіаційної сили, що виникає при цьому, визначається електронною вагою, результат вимірювання передається у

персональний комп'ютер, де і визначається потужність згідно з математичною моделлю, описаною формулами (2.24) – (2.27). Параметри електричного сигналу, що надходять від генератора через підсилювач потужності, контролюються з допомогою осцилографа, напруга на ультразвуковому випромінювачі вимірюється вольтметром.

Для забезпечення заданого робочого діапазону частот та діапазону відтворюваних потужностей використовують комплект ультразвукових випромінювачів (див. рисунок 2.6).

Управління процесом вимірювання і оброблення вимірювальної інформації в реальному часі та процедура оцінювання характеристик точності виконуються на комп'ютері з відповідним програмним забезпеченням.

Температура води та вміст розчиненого в ній кисню під час вимірювання контролюється термометром для води та оксиметром, відповідно.

Для контролю умов довкілля передбачено барометр, термометр та гігрометр.

Розроблено систему захисту від вібрацій, шумів та потоків повітря.

3.4 Висновки до розділу 3

У третьому розділі:

- удосконалено методику мінімізації непевності (метод PUMA) шляхом використання методів числового диференціювання та імітаційного моделювання замість аналітичного способу оцінювання непевності;

- застосовано удосконалену методику мінімізації непевності (метод PUMA) для еталона одиниці потужності ультразвук на початковій стадії його розроблення;

- розроблено новий адаптивний метод та інформаційну технологію створення еталонів одиниць вимірюваних величин із заданими високими характеристиками точності за умови обмежених ресурсів;
- застосовано розроблений адаптивний метод для створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі;
- подано структурно-функціональну схему еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [97-101, 56].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ

Відповідно до структурної схеми еталона одиниці потужності ультразвуку (рисунок 3.6), розробленої адаптивним методом, змонтували еталонну уставу (рисунок 4.1) для проведення експериментальних досліджень.

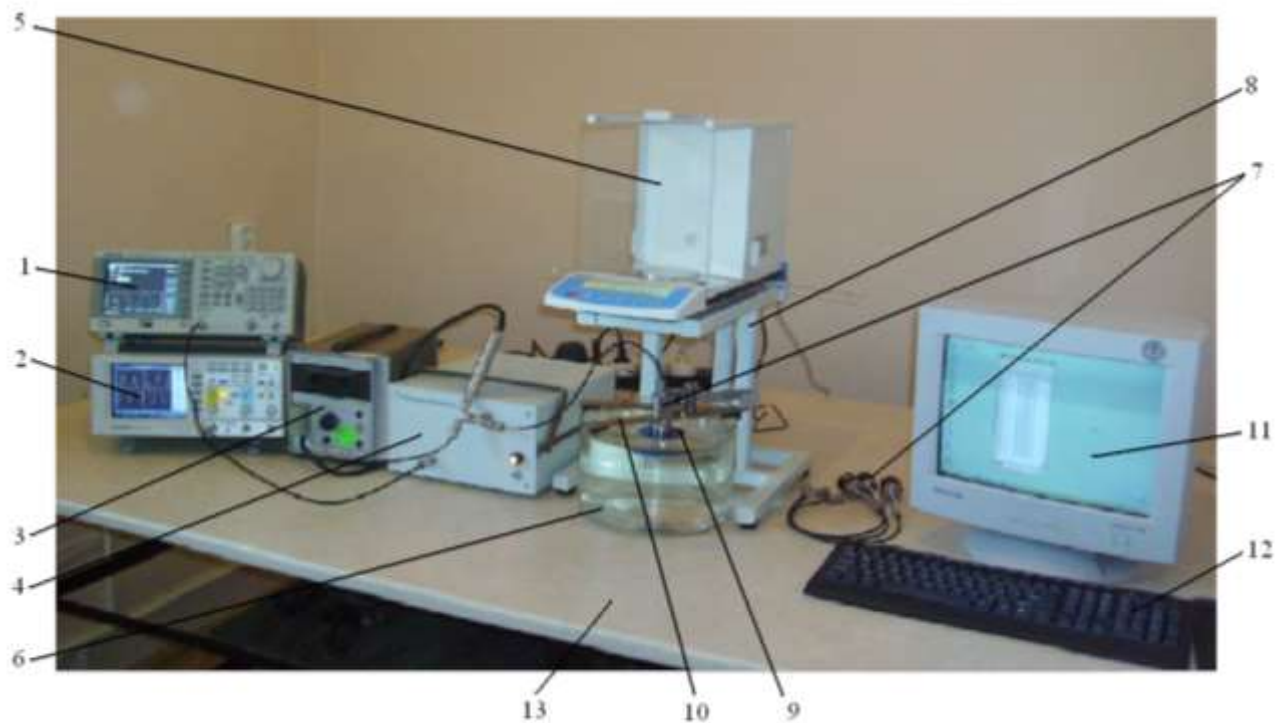


Рисунок 4.1 – Еталонна устава:

- 1 – генератор,
- 2 – осцилограф,
- 3 – вольтметр,
- 4 – підсилювач потужності,
- 5 – терези,
- 6 – ємність,
- 7 – ультразвукові випромінювачі,
- 8 – підставка під терези,
- 9 – мішень на підвісках,

- 10 – затискач випромінювача,
 11 – монітор,
 12 – клавіатура,
 13 – робочий стіл із системою захисту від шуму, вібрацій та повітряних потоків

Під час проведення експериментальних досліджень встановили робочий діапазон частот еталонної устави і діапазон відтворюваних потужностей випромінюваного ультразвуку, оцінили характеристики точності: систематичну і випадкову похибки та розширену непевність у вимірюванні під час відтворення одиниці вимірювання.

Експериментальні дослідження провели відповідно до розробленої і затвердженої методики атестації ДШВК 407259.001 МА «Вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. Методики атестації» (див. додаток Б) у лабораторному приміщенні за наступними умовами довкілля:

Температура оточуючого повітря, °С	21,5 ± 2
Відносна вологість повітря, %	60 ± 20
Атмосферний тиск, мм рт.ст.	735 ± 30
кПа	98 ± 4
Напруга мережі живлення, В	220 ± 22
Частота напруги мережі живлення, Гц	50 ± 0,5
Час прогрівання апаратури еталона, год., не менше,	0,5
Час безперервної роботи апаратури еталона, год., не менше,.....	8,0
Рівень акустичного шуму не повинен перевищувати, дБ відносно $2 \cdot 10^{-5}$ Па.....	48
Рівень вібрації не повинен перевищувати, дБ відносно $3 \cdot 10^{-4}$ м/с ²	36
Температура води, °С	21,5 ± 2

Під час експериментальних досліджень еталонної устави безпосередньо вимірювали напруга і частота збуджуючого сигналу на вході УзВ та знімали (з частотою 4 Гц) покази терезів – значення маси, еквівалентної радіаційній силі. Контролювали умови довкілля і температура води у вимірювальній ємності та вміст кисню, розчиненого у воді. Решта значень вхідних величин брали з довідників, стандартів та паспортів приладів та отримували безпосередньо в процесі експериментальних досліджень еталона.

Зокрема, поправка на вимірювання напруги на вході УзВ та відхилення її від опорного значення визначили як квадрат їх відношення відповідно до залежності від напруги випромінюваної УзВ ультразвукової потужності W_e поданої формулою (2.38).

4.1 Дослідження метрологічних характеристик еталонної устави

Оцінювання метрологічних характеристик еталонної устави проводили відповідно до вимог МИ 2083 [106] з урахуванням ДСТУ ГОСТ 8.381 [107].

Для еталонної устави встановили наступну номенклатуру метрологічних характеристик:

- невилучена систематична похибка, яка подана у формі границь основної НСП за довірчої імовірності 0,99;
- випадкова похибка у вигляді середньоквадратичного відхилу результату вимірювання під час передавання одиниці потужності за 10-ти незалежних спостережень.

Розглянемо спочатку оцінювання СКВ випадкової похибки результату вимірювання під час передавання одиниці потужності.

Оскільки, електронні терези використовували у складі ультразвукового вимірювального блока еталонної устави у режимі, не передбаченому його

настановами з експлуатації, проводили їх калібрування з допомогою еталонних різноважок.

Для захисту ультразвукового вимірювального блока від повітряних і теплових потоків, шуму і вібрації передбачили захисний кожух (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Захисний кожух

Результати калібрування ультразвукового вимірювального блока подано в таблиці 4.1 [110].

Таблиця 4.1 – Результати калібрування ультразвукового вимірювального блока

Вага різноважок, мг		Покази ультразвукового вимірювального блока, в мг				СКВ, $S_{\bar{x}}$, %	Відхилення від фактичної	
номінал.	факт.	№ спостереження			середнє		мг	%
		1	2	3				
10	9,93	9,96	9,98	9,93	9,96	0,18	0,03	0,30
20	20,11	20,26	20,12	20,10	20,16	0,28	0,05	0,25
30	30,15	30,17	30,18	30,10	30,15	0,10	0,00	0,00
50	50,12	50,12	50,04	50,10	50,09	0,06	-0,03	-0,06
100	100,83	100,88	100,82	100,81	100,84	0,02	0,01	0,01
200	200,08	200,07	200,01	200,07	200,05	0,01	-0,03	-0,01
300	300,93	300,89	300,89	300,894	300,89	0,00	-0,04	-0,01
500	498,84	498,82	498,86	498,829	498,84	0,00	0,00	0,00

Як видно з таблиці 4.1 відхилення показів у діапазоні від 10 мг до 500 мг не перевищують 0,05 мг, або (0,25 ÷ 0,30) %. Середньоквадратичний відхил результату вимірювання $S_{\bar{x}}$ лежить у межах від нуля до 0,28 %.

Робочий діапазон частот еталонної устави і діапазон відтворюваних потужностей випромінюваного ультразвуку забезпечували комплектом еталонних ультразвукових випромінювачів (див. рисунок 2.6).

Резонансні частоти та технічні характеристики комплекту ультразвукових випромінювачів подано в таблиці 4.2 [110].

Як видно з таблиці 4.2 ряд резонансних частот, на яких ефективно працюють ультразвукові випромінювачі, охопили робочий діапазон частот від 0,5 МГц до 20 МГц.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики еталонних ультразвукових випромінювачів

Позначення УзВ	Розмір диска, мм		Резонансна частота, МГц	Ємність номінальна, нФ	Тангенс кута діелектричних втрат
	діаметр	товщина			
<i>УзВ з п'єзокерамічними дисковими чутливими елементами з п'єзокераміки ЦТС-19</i>					
66x3 -1	66	3	0,66	19,88	0,0124
75x2,45 -1	75	2,45	1,06	15,35	0,0047
20x1,4 -1	20	1,4	1,32	2,567	0,0132
25x1 -1	25	1	1,96	7,023	0,0154
25x1 -2	25	1	1,94	6,843	0,0142
15x0,36 -1	15,5	0,36	6,53	6,291	0,0135
25x0,36-1	25	0,36	6,10	17,19	0,0162
<i>УзВ з п'єзоелектричним монокристалічним дисковим чутливим елементом з ніобату літію</i>					
30x2М -1	30	2	1,572	0,275	0,0017
			5,280		
			8,863		
			12,431		
			15,993		
			19,554		

Вимірювана потужність ультразвуку, випромінювана УзВ, залежить від стабільності характеристик останніх. Особливістю УзВ з пьезоелектричними

чутливими елементами є те, що його характеристики суттєво змінюються в процесі калібрування і відповідно змінюється радіаційна сила та випромінювана потужність.

Температура чутливого елемента УзВ суттєво впливає на випромінювану потужність. Зміна температури на 1 °С призводить до зміни потужності до 5 %. Температура чутливого елемента УзВ відома лише на момент його включення – вона дорівнює температурі води у вимірювальній ємності (за умови, що УзВ замокав у воді достатній період часу). Тому вимірювану потужність і пов'язану з нею електроакустичну провідність рекомендують визначати на момент включення УзВ, коли його температура відома [33].

Отже, процес випромінювання на еталонній установі не був стаціонарним. Характерну реалізацію процесу вимірювання еквівалентної маси представлено на рисунку 4.3 [56, 110].

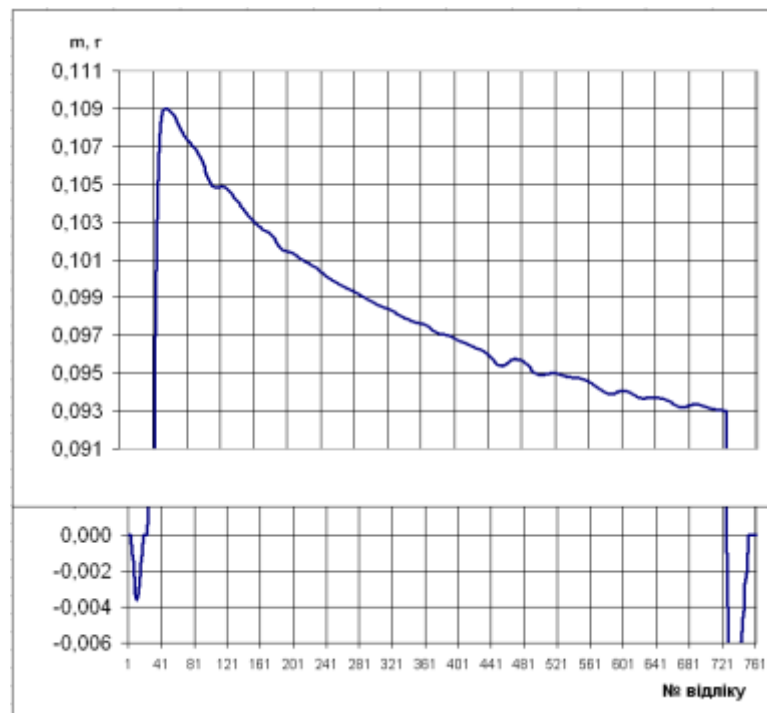


Рисунок 4.3 – Характерний хід процесу реєстрації еквівалентної маси m під час вимірювання потужності (час подано в одиницях відліку, яка складає 0,25 с)

Як видно з рисунку 4.3, по закінченню перехідного процесу на початковій стадії досягається максимум показу терезів, після чого йде поступовий спад, пов'язаний із зміною електроакустичних характеристик активного елемента УзВ за рахунок зміни температури під дією збуджуючого сигналу. Відповідно до рекомендації [33] за результат вимірювання потужності брали її значення на момент включення УзВ, коли температура активного елемента і води в околі нього контрольована. Для цього розробили комп'ютерну програму для регресійного аналізу виділеної ділянки зареєстрованої реалізації та наступної екстраполяції результату назад до моменту подання на УзВ збуджуючого сигналу.

На рисунку 4.4 подано приклад визначення потужності екстраполяцією до моменту увімкнення УзВ [110]. Для апроксимації кривої, отриманої за результатами спостережень, використали поліном третього степеню.

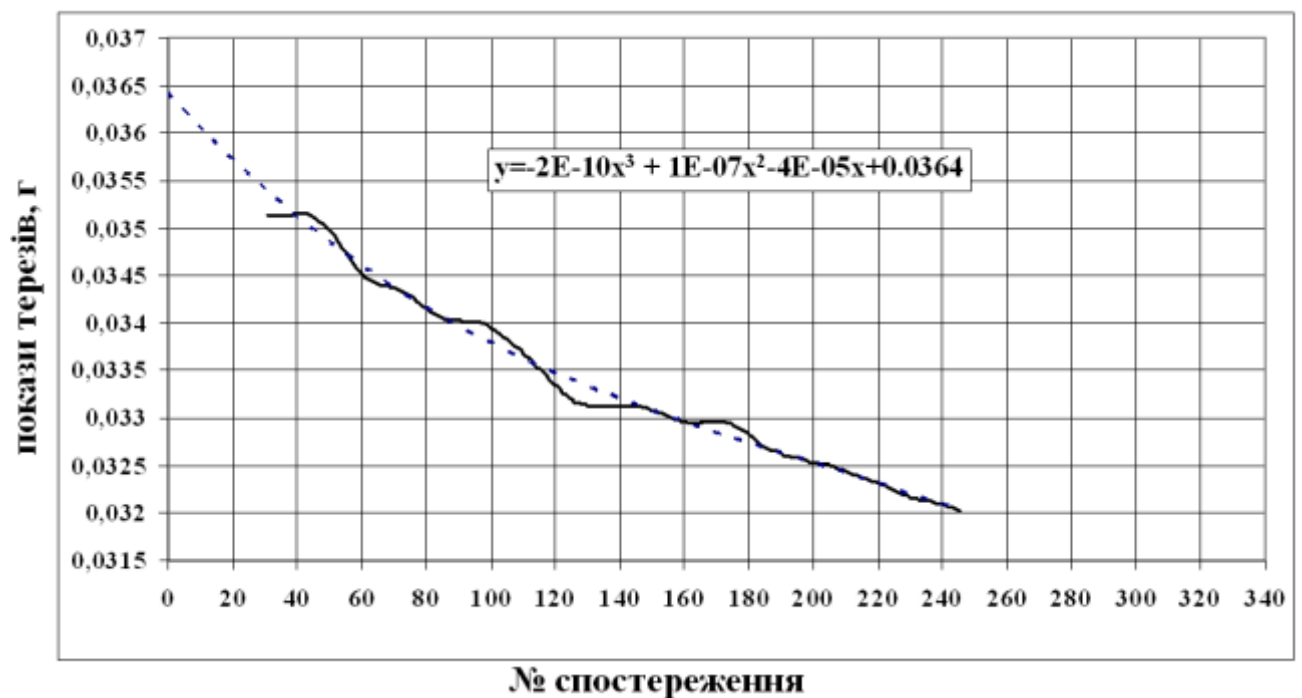


Рисунок 4.4 – Визначення потужності екстраполяцією до моменту увімкнення УзВ 25x1-2 . Напруга $V_{\text{эф}}$ на вході УзВ 2,14 В

Результати вимірювання потужності, випромінюваної на резонансній частоті/частотах кожного УзВ (див. таблиці 4.2), описаним вище методом, залежно від рівня напруги генератора подано в таблицях 4.3 і 4.4 [110].

Таблиця 4.3 – Результати вимірювання потужності ультразвуку, випромінюваної УзВ з п'єзокерамічними чутливими елементами

Позначення УзВ	Частота збуджуючого сигналу, МГц	Ефективна наруга на вході УзВ, мВ	Потужність ультразвуку, мВт	СКВ, $S_{\bar{x}}$, %
66x3-1	0,66	632	32,2	1,2
		2530	528,0	0,6
		3890	1301,0	1,7
75x2,45-1	1,06	159	3,3	3,1
		596	72,2	2,8
		2590	1338,0	1,8
20x1,4-1	1,32	1213	5,7	2,0
		1890	15,9	1,8
		2717	33,9	1,1
		4317	81,1	1,9
		6627	217,7	1,6
25x1-2	1,94	515	30,9	2,9
		2127	534,0	0,1
		3717	1551,0	0,6
	5,76	966	43,9	3,1
		1420	67,1	2,9
		1600	85,5	2,6
15x0,36 -1	6,53	1840	201,0	0,1
		3140	571,0	0,3
		4573	1204,0	0,1

Таблиця 4.4 – Результати вимірювання потужності ультразвуку, випромінюваної УзВ з п'єзоелектричним чутливим елементом з монокристалу – УзВ 30x2М-1

Частота збуджуючого сигналу, МГц	Ефективна наруга на вході УзВ, мВ	Потужність ультразвуку, мВт	СКВ, $S_{\bar{x}}$, %
1,572	1333	7,6	1,3
	6587	193,0	0,6
5,280	1200	7,1	1,9
	6397	190,0	0,2

Продовження табл. 4.4

Частота збуджуючого сигналу, МГц	Ефективна наруга на вході УзВ, мВ	Потужність ультразвуку, мВт	СКВ, $S_{\bar{x}}$, %
8,863	769	3,0	2,7
	1583	14,1	2,5
	9343	358,0	0,6
12,431	915	5,0	3,1
	1833	23,1	1,0
	10133	636,0	0,4
15,993	974	7,6	0,8
	1950	34,6	0,6
	10673	895,0	0,6
19,554	478	2,4	1,6
	964	12,8	0,9
	4513	196,6	0,4

З таблиці 4.3 видно, що еталонна устава з комплектом УзВ з п'єзокерамічними чутливими елементами забезпечила вимірювання і передавання одиниці потужності від 3,7 мВт до 1,6 Вт у діапазоні частот від 0,66 МГц до 6,50 МГц із середньоквадратичним відхилом випадкової похибки результату вимірювання $S_{\bar{x}}$ від 0,1 % до 3,1 %. Спостерігали залежність СКВ $S_{\bar{x}}$ від рівня вимірюваної потужності ультразвуку: за низьких рівнів потужності СКВ $S_{\bar{x}}$ збільшувалась.

Еталонна устава з ультразвуковим випромінювачем УзВ 30x2М-1 з монокристалічним чутливим елементом з ніобату літію забезпечила в діапазоні частот від 1,6 МГц до 20 МГц вимірювання ультразвукової потужності в діапазоні від 2,4 мВт до 0,9 Вт з СКВ $S_{\bar{x}}$ від 0,2 % до 3,1 % залежно від рівня потужності.

Таким чином, еталонна устава з комплектом ультразвукових випромінювачів забезпечила відтворення, зберігання і передавання розміру одиниці потужності ультразвуку в діапазоні потужностей від 2,4 мВт до 1,6 Вт у діапазоні частот від 0,5 МГц до 20 МГц із середньоквадратичним відхилом від 0,2 % до 3,1 %.

Випромінювана потужність ультразвуку розраховували за формулами математичної моделі (2.24)-(2.27); електроакустична провідність УзВ G за формулою (3.10).

Результати визначення електроакустичної провідності УзВ подано в таблиці 4.5 [110].

Таблиця 4.5 – Результати визначення електроакустичної провідності УзВ

Позначення УзВ	Частота збуджуючого сигналу, МГц	Електроакустична провідність, мСм	СКВ, $S_{\bar{x}}$, %
66x3-1	0,66	82,99	2,2
75x2,45-1	1,06	183,63	4,2
20x1,4-1	1,32	4,57	2,5
25x1-2	1,94	112,40	3,4
15x0,36 -1	6,53	58,32	1,1
30x2М-1	1,572	4,36	2,7
	5,280	4,77	3,1
	8,863	4,83	3,6
	12,431	6,35	4,6
	15,993	8,36	4,8
	19,554	11,27	12,3

Оцінювання НСП еталонної устави.

Довірчі границі НСП еталонної устави Θ_0 обчислювали відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.381 [107] та МИ 2083 [106], як для опосередкованих вимірювань

$$\Theta_0 = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \Theta_i^2}, \quad (4.1)$$

де $k = 1,4$ – поправковий коефіцієнт за довірчої імовірності 0,99;

b_i – коефіцієнт чутливості для i -тої складової:

$$b_i = \frac{\partial f}{\partial a_i}, \quad (4.2)$$

де f – модельна функція,

a_i – i -та складова модельної функції (i -та вхідна величина);

Θ_i – границі НСП i -тої складової.

Результати розрахунку довірчих границь НСП еталонної устави за формулами (4.1) і (4.2) подано в таблиці 4.6 [110].

Таблиця 4.6 – Результати розрахунку границь НСП Θ_v еталонної устави

Найменування вхідної величини	Позначення	Номинальні значення	Похибка		Коефіцієнт чутливості	Внесок у НСП
			абс.	%		
Швидкість звуку у воді	c	1491 м/с	1,00	$7,0 \cdot 10^{-2}$	1,0	$7,0 \cdot 10^{-2}$
Радіаційна сила	F	3,4÷68,3 мГ	0,11	1,6÷3,2	1,0	1,6÷3,2 ¹⁾
Частота збуджуючого сигналу	f	0,5÷20 МГц	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-0,11	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Температура води	t	21,5 °С	2,00	-	0,2	0,4
Прискорення земного тяжіння	g	9,8107 м/с ²	0,001	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1,0	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Границі НСП	Θ_v	від 2 % до 4 %¹⁾				

¹⁾Більше значення відповідає мінімальній потужності $P_{\min} = 0,05$ Вт

Як видно з таблиці 4.6, НСП еталонної устави лежить у межах від 2 % до 4 %.

4.2 Оцінювання непевності вимірювання еталонної устави

Характеристики непевності визначали аналітичним способом відповідно до Guid-98-3 [111, 112] з врахуванням ДСТУ Н-РМГ 43 [113] та методом Монте-Карло згідно з Guid-98-3/Suppl.1 [96]. Аналітичний метод і метод імітаційного моделювання (МСМ) дали близькі результати.

4.2.1 Аналітичний метод оцінювання непевності вимірювання

Коефіцієнтів чутливості знаходили, як частинні похідні (див. додаток В) відповідно до [112]. При аналізі зв'язків між вхідними

величинами не виявили суттєвої кореляції, тому всі джерела непевності приймали некорельованими.

Програмне забезпечення для розрахунку бюджету непевності розробили на мові Visual Basic 6.3 програмного комплексу електронних таблиць Microsoft Excel XP [88]. Бюджет непевності подано в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Бюджет непевності еталонної устави. Аналітичний метод

Найменування вхідної величини	Позначення	Одиниці вимірювання	Номинальні значення	Характеристики точності, %	Стандартна непевність $u(x)$, %	Закон розподілу PDF	Коефіцієнти чутливості	Внесок $u(y)$, %	Частка внеску, %
Складові стандартної непевності, оціненої за типом В									
Покази терезів	m	мг	3,4±68,3	0,6±2,8	0,7±1,7	нормальні	1,00	0,70±1,70	95,90-99,28
Частота збуджуючого сигналу	f	МГц	0,5±20	1·10 ⁻⁴	0,7·10 ⁻⁴	рівноміри	0,01	0,00	0,00
Прискорення земного тяжіння	g	м/с ²	9,8107	1·10 ⁻³	0,7·10 ⁻³	рівноміри	1,00	0,00	0,00
Радіус ультразвукового випромінювача	a	мм	var	4	2,3	рівноміри	0,03	0,70	0,16±0,93
Швидкість звуку у воді	c	м/с	1491,5	7·10 ⁻²	4·10 ⁻²	рівноміри	1,00	0,04	0,05±0,31
Поправка на відхилення температури води від опорного значення	P_T	°C	0	0,2	0,12	рівноміри	1,00	0,12	0,49±2,80
Методична поправка	P_M	Вт	0	0,02	0,01	рівноміри	1,00	0,01	0,01±0,03
Поправка на недосконалість мішені та бачка	P_K	Вт	0	0,01	0,01	рівноміри	1,00	0,01	0,01±0,03
Стандартна непевність за типом В u_B –				від 0,83 % до 1,65 % ¹⁾					
Стандартна непевність за типом А u_A –				від 0,2 % до 3,1 % ¹⁾					
Сумарна стандартна непевність u_C –				від 0,85 % до 3,4 % ¹⁾					
Розширена непевність ($k = 2$) U –				від 2 % до 7 % ¹⁾					

¹⁾Більше значення відповідає мінімальній потужності $P_{\min} = 0,05$ Вт

При розрахунку бюджету непевності еталонної устави, не враховували напруга на вході УзВ, як вхідну величину. Але при проведенні міжнародних звірень національних еталонів одиниці потужності ультразвуку [46, 102, 103] нормують електроакустичну провідність УзВ G , тому в таблиці 4.8 подано приклад розрахунку бюджету непевності з врахуванням внеску напруги на вході УзВ.

Як видно з таблиць 4.7 та 4.8 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 – $u_C = (0,9 - 3,4)$ %

Таблиця 4.8 – Бюджет непевності еталонної устави (електроакустична провідність). Ультразвуковий випромінювач 25x1-1. Аналітичний метод.

Найменування вхідної величини	Позначення	Одиниці вимірювання	Номинальні значення при номінальній потужності		Характеристики точності, %		Модельний закон розподілу	Стандартна непевність $u(x_i)$, %		Коефіцієнт чутливості	При номінальній потужності			
			400 мВт	1000 мВт	400 мВт	1000 мВт		400 мВт	1000 мВт		400 мВт		1000 мВт	
											Внесок $u_i(f)$, %	Частка внеску, %	Внесок $u_i(f)$, %	Частка внеску, %
Напруга на ультразвуковому випромінювачі	V	В	2,00	3,04	2,0		рівн.	1,16		-2,00	2,30	74,62	2,32	71,63
Покази терезів	m	мг	28,40	71,67	1,27	1,06	норм.	0,63	0,53	1,00	0,63	5,60	0,53	3,80
Частота збуджуючого сигналу	f	МГц	1,877		$5 \cdot 10^{-6}$		рівн.	0,00		0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Прискорення земного тяжіння	g	м/с ²	9,81		$1 \cdot 10^{-3}$		рівн.	0,00		1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Радіус ультразвукового випромінювача	a	мм	12,50		4,0		рівн.	2,31		0,03	0,14	0,27	0,06	0,06
Швидкість звуку у воді	c	м/с	1491,5		$7 \cdot 10^{-2}$		рівн.	0,00		1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Поправка на відхилення температури води від опорного значення	P_T	°C	0,00		0,2		рівн.	0,12		1,00	0,12	0,20	0,12	0,19
Методична поправка	P_M	Вт	0,00		0,02		рівн.	0,01		1,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Поправка на недосконалість мішені та бачка	P_H	Вт	0,00		0,01		рівн.	0,01		1,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Середньоквадратичне відхилення	$S_{\bar{x}}$	%	1,17	1,34				1,17	1,34		1,17	19,31	1,34	24,32
Сумарна стандартна непевність u_c , %											2,66		2,72	
Коефіцієнт розширення при рівні довірчої імовірності 0,95											2		2	
Розширена непевність при рівні довірчої імовірності 0,95; U , %											5,33		5,44	

4.2.2 Застосування методу Монте-Карло для дослідження непевності вимірювання

Аналітичні методи оцінювання непевності вимірювання, як відомо, дають точні результати тільки у відносно простих випадках при наступних припущеннях [111]: модель вимірювання лінійна; розподіл густини ймовірності (PDF) вхідних величин симетричний; внески непевності вхідних величин у сумарну непевність приблизно однакові; густина ймовірності вихідної величини розподілена симетрично за законом Гауса; розширену непевність при заданій довірчій ймовірності визначають як добуток сумарної стандартної непевності на деякий коефіцієнт розширення.

Але більшість цих умов, як показали дослідження, не виконуються для акустичних еталонів [91, 95].

У МСМ немає необхідності попередньо обчислювати стандартні непевності вхідних величин; достатньо мати межі варіювання і встановити модельний закон [96, 114-116].

Для імітаційного моделювання процесу вимірювання на еталонній установі одиниці потужності ультразвуку за МСМ розробили універсальну програму на мові Delphi 6 (див. додаток Г). На рисунку 4.5 подано діалогове вікно даної програми.

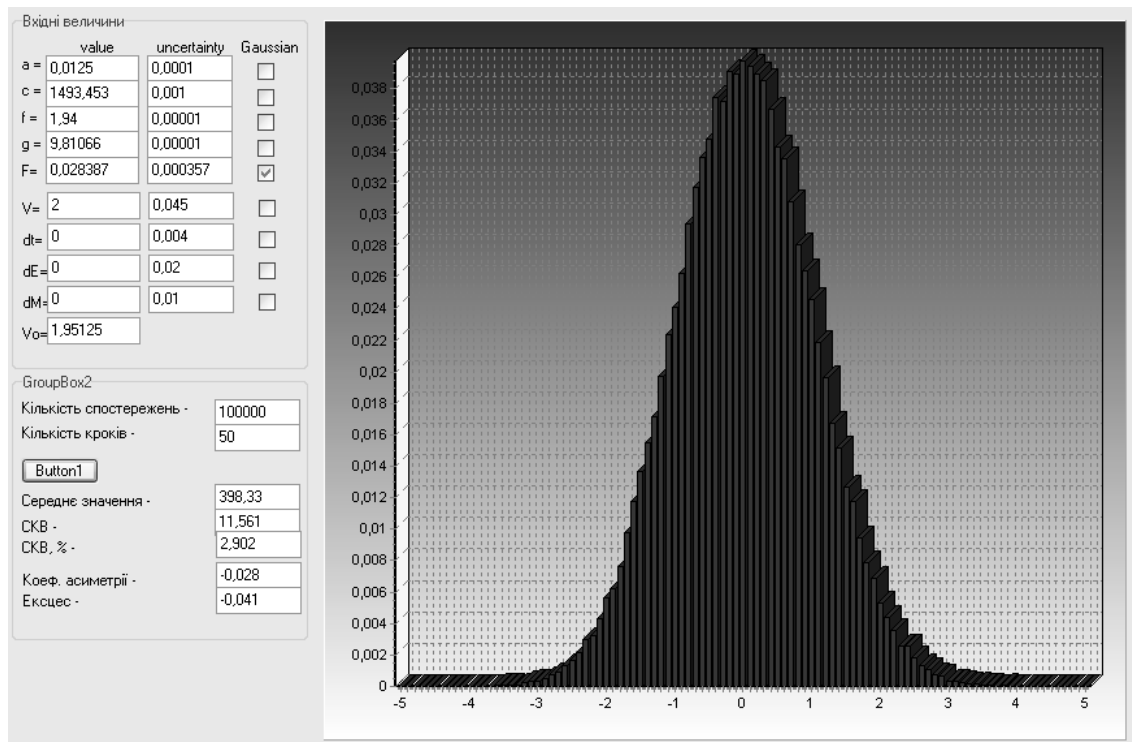


Рисунок 4.5 – Діалогове вікно програми для імітаційного моделювання процесу вимірювання на еталонній установі одиниці потужності ультразвуку за методом Монте-Карло

Суть МСМ щодо дослідження непевності вимірювання полягала в наступному [117-119]: кожен раз при обчисленні функції вимірювання в рівнянні математичної моделі (2.24)-(2.27) підставляли генеровані випадкові значення вхідних величин, кожна з яких варіює навколо свого номінального значення в межах інтервалу непевності у відповідності зі своїм законом

розподілу густини імовірності. При цьому номінальні значення таких вхідних величин, як покази терезів, частота збуджуючого сигналу, напруга на ультразвуковому випромінювачі брали безпосередньо з даних експериментальних досліджень. Отриманий у процесі багаторазових спостережень, змодельованих на комп'ютері, масив значень вихідної величини, який несе повну інформацію про вимірювану величину - потужність ультразвукового випромінювання, обробляли статистично; весь масив при цьому розбивали на 50 інтервалів. При кожному вимірі проводили не менше 100 000 спостережень, змодельованих на комп'ютері. При числі спостережень менш 10000 результати виявлялися статистично нестійкими. Найкращу оцінку вимірюваної величини визначали як середнє арифметичне. Оцінку сумарної стандартної непевності обчислювали як експериментальний середньоквадратичний відхил (за типом А). Розширену непевність при заданій довірчій ймовірності знаходили безпосередньо з інтегрального розподілу ймовірності вихідної величини, не вдаючись при цьому до попереднього обчислення ефективного числа ступенів свободи і встановлення коефіцієнта розширення. Коефіцієнт розширення для довірчої ймовірності 0,95 навпаки розраховано за розширеної непевності.

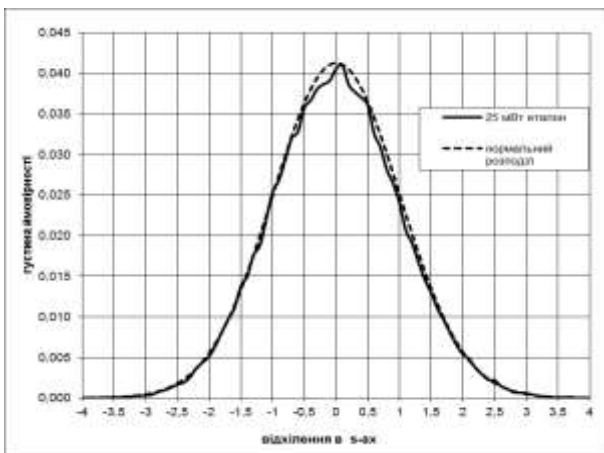
Оцінили внесок непевності кожної вхідної величини у сумарну стандартну непевність вихідної, а також їх частки внеску (як відношення квадрата вкладу у відсотках до квадрату відносної сумарної стандартної непевності).

МСМ дозволяє визначити сукупний закон розподілу вихідної величини відповідно до закону розподілу кожної з вхідних величин. У програмі, за замовчуванням, для вхідних величин приймали прямокутний закон розподілу, але його можна змінювати на нормальній.

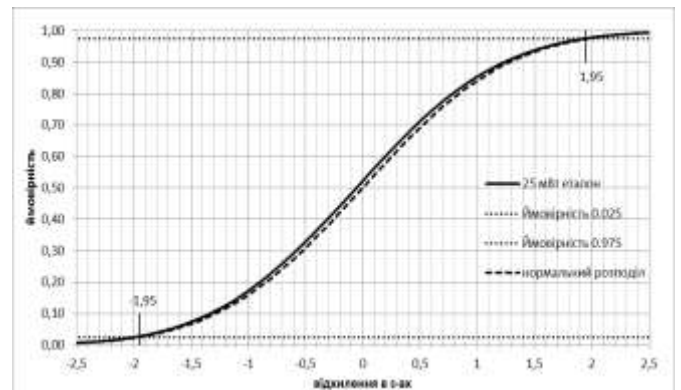
Результати досліджень представлено у вигляді бюджету непевності при номінальній потужності 400 мВт та 1000 мВт (див. таблицю 4.9) і проілюстровано на рисунку 4.6 при номінальній потужності 25 мВт.

Таблиця 4.9 – Бюджет непевності вимірювання на еталонній устатці за методом Монте-Карло

Найменування	Вхідні величини						Вихідні величини				
	Позначення	Одиниці вимірювання	Номинальні значення при номінальній потужності, мВт		Характеристики точності (відхилення) при номінальній потужності, мВт		Модельний закон розподілу	при номінальній потужності, мВт			
			400	1000	400	1000		400		1000	
								Внесок, %	Частка внеску, %	Внесок, %	Частка внеску, %
Напруга на ультразвуковому випромінювачі	U	В	2,00	3,04	0,045	0,061	рівн.	1,28	19,61	1,16	21,14
Покази терезів	m	мг	28,4	71,2	0,36	0,76	норм.	2,51	74,90	2,15	72,30
Частота збуджуючого сигналу	f	МГц	1,940		0,00001		рівн.	0,17	0,34	0,12	0,24
Прискорення земного тяжіння	g	м/с ²	9,811		0,00001		рівн.	0,27	0,90	0,12	0,24
Радіус ультразвукового випромінювача	a	мм	12,5		0,0001		рівн.	0,25	0,76	0,20	0,63
Швидкість звуку у воді	c	м/с	1491,5		0,001		рівн.	0,19	0,41	0,00	0,00
Поправка на відхилення температури води від опорного значення	$П_T$	°C	0		0,004		рівн.	0,19	0,41	0,21	0,71
Методична поправка	$П_M$	Вт	0		0,02		рівн.	0,52	3,21	0,60	5,69
Поправка на недосконалість мішені та бачка	$П_B$	Вт	0		0,01		рівн.	0,31	1,17	0,40	2,52
Сумарна стандартна непевність, %								2,90		2,53	
Коефіцієнт розширення при рівні довірчої імовірності 0,95								1,85		1,95	
Розширена непевність при рівні довірчої імовірності 0,95; U , %								5,37		4,93	



а)



б)

Рисунок 4.6 – Диференціальний (а) та інтегральний (б) розподіл густини ймовірності вимірюваної величини (потужності ультразвуку при номінальному значенні 25 мВт) для еталонної устатки

Закон розподілу вихідної величини не суттєво відрізнявся від нормального розподілу (розподілу Гауса) (див. рисунок 4.6 а). З інтегрального розподілу (див. рисунок 4.6 б) знайдено коефіцієнт

розширення для довірчої ймовірності 0,95 за номінальної напруги 25 мВт рівний 1,95, що близько до рекомендованого $k = 2$. У той час при 400 мВт (таблиця 4.9) він знижується до 1,85.

Отримані результати порівняли з результатами оцінювання аналітичним методом. Як видно з таблиць 4.8 та 4.9 різниця між порівнюваними сумарними стандартними непевностями незначна, а розширена непевність відрізняється через коефіцієнт охоплення.

4.3 Створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі

За результатами експериментальних досліджень еталонну уставу переведено в еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі (див. рисунок 4.7) з наступними технічними та метрологічними характеристиками [56, 57, 118, 119, 110]:

- 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 (додаток Д);
- границі основної невилученої систематичної похибки θ_s не перевищують: від 2 % до 4 % (залежно від частоти і рівня потужності) за довірчої ймовірності $P = 0,99$;
- середньоквадратичний відхил 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 – $u_C = (0,9 - 3,4) \%$.

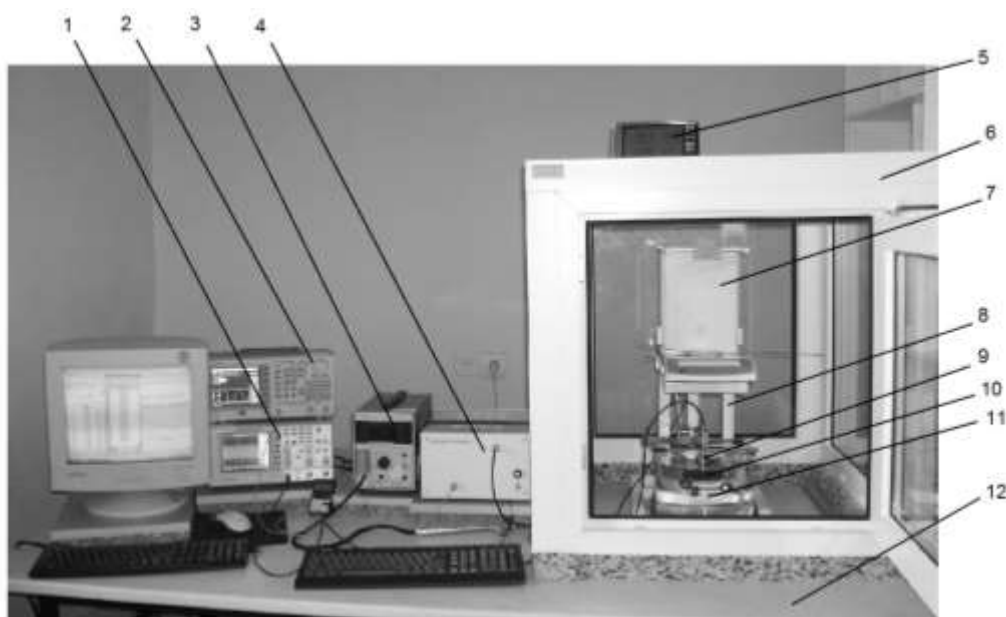


Рисунок 4.7 – Основні складові еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі:

- 1 – осцилограф;
- 2 – генератор;
- 3 – вольтметр;
- 4 – підсилювач потужності;
- 5 – прилад контролю за умовами довкілля;
- 6 – захисний кожух;
- 7 – терези;
- 8 – підставка під терези;
- 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

Метрологічні характеристики створеного еталона порівняли з метрологічними характеристиками національних еталонів одиниці потужності ультразвуку 12-ти зарубіжних країн, які опублікували свої

калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС_s) у базі даних Міжнародного Бюро Мір і Ваги, включно з тими, які підтверджені результатами міжнародних звірень [46, 103] (таблиця 4.10). Як випливає з порівняння, вітчизняний еталон відповідає рівню національних еталонів інших країн.

Таблиця 4.10 – Порівняння метрологічних характеристик вторинного еталона з національними еталонами зарубіжних країн

Країна	НМІ	Потужність, Вт	Частота, МГц	Непевність ($k=2$), %	
				опублікована в КСДВ ВІРМ	за результатами звірення ССАУВ.У-К1
Великобританія	NPL	0,0005 – 1	0,8 – 20	2,5 – 6	3,1 – 5,5
		0,5 – 20	0,8 – 3	3,5 – 5	
Італія	INRIM	0,01 – 0,1	1,8 – 11	6 – 8	
		0,1 – 15	1,8 – 11	3 – 6	
Канада	NRC	0,5 – 1	1 - 3,5	7	6,9 – 20,1
		0,5 – 10	1 - 3,5	10	
Китай	NIM	0,003- 0,5	1; 2; 3; 4; 5	5	2,7 – 3,7
		0,5 – 20	1; 5	5	
Мексика	CENAM	0,1 – 1	1 – 10	11	
Німеччина	PTB	0,002 – 20	1 – 5	3	2,6 – 4,5
		0,002 – 3	5 – 10	3 – 5	
		0,002 – 0,5	11 – 21	5 – 12	
Росія	VNIIFTRI	0,05 – 3	0,5 – 10	6	3,4 – 7
		0,5 – 12	0,5 – 5	5	
		0,002 – 0,5	1 – 15	6	
США	NIST	0,005 – 35	0,5 – 30	2	1,8 – 3,2
Туреччина	UME	0,1 – 1	1 – 3	5	
Австралія	NMIA	0,1 – 1	1,9 – 10,5	-	9 – 16,2
Індія	NPLI	0,01 – 10	1,9	-	3 – 4,7
Нідерланди	NMI/TNO	0,01 – 15	1,9 – 10,5	-	2,1 – 4,3

Україна	ДП НДІ «Система»	0,005 - 4	0,5 - 20	2 – 7 ¹⁾	-
---------	------------------	-----------	----------	---------------------	---

¹⁾ За результатами метрологічної атестації

Створений вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі за результатами роботи приймальної комісії затверджений та введений в дію у грудні 2010 року наказом ДП НДІ «Система» від 24.12.2010 р. № 281 (додаток Е). Йому присвоєно

реєстраційний номер в Реєстрі державних, первинних і вторинних еталонів: ВЕТУ 10-169-01-11 (додаток Е). На сьогодні, еталон ВЕТУ 10-169-01-11 є вихідним для України.

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

4.4 Розроблення нормативної бази передавання розміру одиниці потужності ультразвуку

Метрологічне забезпечення будь-якого виду вимірювання – це комплекс організаційно-технічних заходів, який забезпечує єдність та необхідну точність результатів вимірювання величин. Одним з елементів системи метрологічного забезпечення є наявність відповідної нормативно-правової та нормативно-технічної бази.

Для забезпечення єдності та простежуваності результатів вимірювання при передаванні розміру одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі:

- розроблено і затверджено повірочна схема ЛПУ 10-01-11 передавання одиниці потужності ультразвуку (додаток Ж);

- розроблено методика калібрування ультразвукових випромінювачів на ВЕТУ 10-169-01-11 ДШВК 407259.001 МА1 «Еталонні ультразвукові випромінювачі. Методика калібрування» (додаток З). Ця методика поширюється на еталонні ультразвукові випромінювачі, які калібрують методом балансу згідно з міжнародним стандартом ІЕС 61161 [33] з метою забезпечення простежуваності результатів вимірювання потужності ультразвуку у воді робочими засобами вимірювання до вихідного еталона відповідно до повірочної схеми ЛПУ 10-01-2011 і до еталонів системи одиниць SI згідно з вимогами ДСТУ ІЕС/ISO 17025 [120];

- розроблено методику повірки вимірювачів потужності ультразвуку ДШВК 407259.001 МА2 «Вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі ВЕТУ 10-169-01-11. Методика повірки вимірювача потужності ультразвуку» (додаток З), яка встановлює методи і засоби первинної та періодичної повірки зазначених вище вимірювачів потужності.

4.4.1 Повірочна схема передавання розміру одиниці потужності ультразвуку

Розроблена і затверджена трирівнева локальна повірочна схема України ЛПУ 10-01-11 передавання одиниці потужності ультразвуку (див. додаток Ж) 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.

Відповідно до повірочної схеми вторинний еталон бере одиницю потужності ультразвуку – ват (Вт) у водному середовищі від опорного значення ключових звірянь СІРМ через участь у періодичних регіональних ключових звіреннях із зарубіжними первинними еталонами цієї одиниці.

Як робочі еталони одиниці потужності ультразвуку у воді використовують комплект еталонних випромінювачів з п'єзокерамічними та монокристалічними п'єзоелектричними чутливими елементами в діапазоні потужностей – від 0,005 Вт до 1 Вт і в діапазоні частот – від 0,5 МГц до 20 МГц.

Як робочі засоби вимірювання використовують вимірювачі потужності ультразвуку у водному середовищі в діапазоні від 0,05 Вт до 10 Вт у частотному діапазоні від 0,5 МГц до 15 МГц з границями допустимої відносної похибки δ_e не більше – від 8 % до 20 % (залежно від частоти і рівня вимірюваної потужності)

Введенням у дію еталона ВЕТУ 10-169-01-11 і затвердженої повірочної схеми ЛПУ 10-01-2011 та інших нормативних документів, була фактично створена в Україні перша черга системи метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі і досягнута єдність та необхідна точність в мегагерцовому діапазоні частот на національному рівні.

На жаль, метрологічна перевірка засобів вимірювання відповідно до схеми метрологічної перевірки ще не гарантує єдності та визнання результатів вимірювання на міжнародному рівні. Згідно з міжнародними правилами [121, 122] для цього треба забезпечити простежуваність результатів вимірювання до еталонів системи одиниць SI.

Для того, щоб досягнути непевності вимірювання, яка б не перевищувала максимально допустиму похибку (20 %), у країні треба мати національний первинний еталон, оснащений відповідно до зарубіжних аналогів сучасною вимірювальною апаратурою (у першу чергу високочастотним вольтметром і підсилювачем потужності) і який міг би брати безпосередню участь у ключових звіреннях Міжнародного Бюро Мір і Ваги. Вихідний вторинний еталон, що бере одиницю вимірювання у зарубіжного первинного еталона з допомогою еталона-переносника (шляхом калібрування під час регіонального звірення) різко втрачає в точності. Не дивлячись на те, що передавання одиниці вимірювання робочим засобам вимірювання від вторинного еталона передбачено прямим методом безпосередньо після калібрування еталонних випромінювачів на вторинному еталоні, необхідна точність і простежуваність вимірювання потужності не може бути досягнута на вторинному еталоні [58-60].

Таким чином, для того щоб забезпечити довіру до результатів вимірювання потужності випромінюваного ультразвуку не тільки на національному, але і на міжнародному рівні, необхідно подальше вдосконалення системи метрологічного забезпечення в мегагерцовому діапазоні частот в Україні. А для цього треба вторинний еталон ВЕТУ 10-

169-01-11 перевести в ранг первинного, доукомплектувавши його сучасним підсилювачем потужності та прецизійним високочастотним вольтметром, розробити державну повірочну схему (ланцюг метрологічної простежуваності) та нову нормативну документацію [58, 60].

4.5 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі:

- подано та проаналізовано результати експериментальних досліджень для визначення метрологічних характеристик створюваного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі;

- розроблено методику та прикладне програмне забезпечення для оцінювання непевності еталона;

- застосовано метод Монте-Карло для оцінювання непевності еталона, що дозволило зменшити в два рази трудомісткість оцінювання непевності вимірювання еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі;

- 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 10-01-11;

- розроблено та впроваджено методику атестації еталона, методику калібрування ультразвукових випромінювачів на еталоні та методику перевірки вимірювачів потужності ультразвуку;

- подано рекомендації щодо подальшого вдосконалення системи метрологічного забезпечення вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі в мегагерцовому діапазоні в Україні.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [29, 56, 58-60, 117-119].

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 еталоном 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 відтворених потужностей – від 0,05 Вт до 4 Вт; границі основної невилученої систематичної похибки θ_s 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 методику атестації еталона ВЕТУ 10-169-01-11, методики калібрування ультразвукових випромінювачів на еталоні та повірки 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Envolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the Role of BIPM. A report prepared by the CIPM for the governments of the Member States of the Meter Convention. [Electronic Resource]; BIPM. - 2003. – 164 p. – Mode of access: <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/kaarls2003-EN.pdf>. – Title from the screen.
2. Паракуда В.В. Еволюція вимог до метрології / В.В. Паракуда, Б.Д. Колпак, В.П. Чалий. // Український метрологічний журнал. – 2005. – №3. – С. 56–60.
3. Про метрологію та метрологічну діяльність [Електронний ресурс] : закон України [прийнято Верхов. Радою 05 червня 2014 р. № 1314-VII]. – Режим доступу : <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>.
4. Про схвалення Концепції розвитку державної метрологічної системи на період до 2015 року [Електронний ресурс] : розпорядження [прийнято Кабінетом Міністрів України 25 червня 2008 № 874-р]. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/874-2008-p>.
5. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes [Electronic Resource]; BIPM – Paris, 1999. – Mode of access: http://www.bipm.org/en/cipm-mra/mra_main_text.html – Title from the screen.
6. Сидоренко Г.С. Актуальные задачи прикладной метрологии в свете современных тенденций научно-технического и экономического развития / Г.С. Сидоренко, В.П. Оголюк, А.В. Прокопов, В.А. Кашей // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2002): Зб. наукових праць III Міжнар. наук.-техн. конфер. – Харків, 2002 – С. 47–49.
7. Державна програма розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки [Електронний ресурс] : постанова [прийнято Кабінетом Міністрів

- України 01 березня 2006 № 228]. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/228-2006-п>.
8. Перелік завдань щодо реалізації Заходів Державної програми розвитку еталонної бази на 2006 – 2010 роки [Електронний ресурс] : наказ [видано Держспоживстандартом України 10 травня 2006 р. № 140]. – Режим доступу: <http://ua-info.biz/legal/basezt/ua-dmtber/index.htm>.
 9. Баби́ков О.И. Ультразвук и его применение в промышленности / О.И. Баби́ков. – М: Гос.изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. – 260 с.
 10. Хорбенко И.Г. В мире неслышимых звуков / И.Г. Хорбенко. – М: Машиностроение, 1971. – 248 с.
 11. Гуревич А.К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений / А.К. Гуревич. – Киев: Гос.изд-во технической литературы УССР, 1963. – 228 с.
 12. Поляков В.Е. Ультразвуковой контроль качества конструкций / В.Е. Поляков, А.И. Потапов, А.К. Сборовский. – Л.: Судостроение, 1978. – 200 с.
 13. Техническая акустика в горном деле [сб. трудов]. – М.: Московский горный институт, 1968. – 127 с.
 14. Ультразвуковые преобразователи [под. ред. К. Кикучи]. – М.: МИР, 1972. – 424 с.
 15. Еняков А.М. Метрологическое обеспечение ультразвукового медицинского оборудования / А.М. Еняков. – М: ВНИИФТРИ, 2006. – 160 с.
 16. Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення: ДСТУ 3974: 2000. – [Чинний від 2000-07-01]. – К.: Держстандарт України, 2001 – 38 с. – (Державний стандарт України).
 17. Directive 98/79/EC of the european parliament and of the council of 27 October 1998 on in vitro diagnostic medical devices [Electronic Resource] // Official Journal of the European Communities. – 1998. – 37 p. – Mode of access: <http://eur-lex.europa.eu/legal->

- content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31998L0079&from=BG – Title from the screen.
18. Memorandum of understanding between The World Health Organization (WHO) and The International Committee For Weights And Measures (CIPM) related to traceability of measurements in laboratory medicine [Electronic Resource] – 2002. – 3 p. – Mode of access: <http://search.bipm.org/bipm/en/C=?q=MoU-CIPM-WHO.pdf&action=s&setcontext=&x=0&y=0> – Title from the screen.
19. Essential Acoustics and Ionising Radiation projects to be carried out between October 2010 and September 2011 [Electronic Resource] : NPL Report / NPL; Editor: A DuSautoy. - Teddington, 2009 – 27 p. – Mode of access: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/essential_projects.pdf – Title from the screen.
20. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения / Р. Дж. Боббер.; пер. с англ. под ред А.Н. Голенкова. – М: МИР, 1974 – 363 с.
21. Блинова Л.П. Акустически измерения / Л.П. Блинова, А.Е. Колесников, Л.Б. Ланганс. – М: Изд-во стандартов, 1971 – 271 с.
22. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / [глав.ред. И.П. Голямина]. – М.: «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с.
23. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения / А.Е. Колесников. – М: Изд-во стандартов, 1970. – 238 с.
24. Широков К.П. Общие вопросы метрологии / К.П. Широков. – М: Машиностроение, 1967. – 221 с.
25. Бурдун Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М: Изд-во стандартов, 1985. – 256 с.
26. Бичківський Р.В. Основи метрологічного забезпечення / Р.В. Бичківський, В.І. Зорій, П.Г. Столярчук. – Львів, ДУ «Львівська політехніка», 1999. – 180 с.
27. Основы метрології та вимірювальної техніки: у 2 т./ [М. Дрошовець, В. Мотало, Б. Стадник та ін.]. – Львів: Вид-во Національного

- університету «Львівська політехніка», 2004 – . – Т.1: Основи метрології. – 2004. – 529 с.
28. Микийчук М. М. Метрологічне забезпечення якості продукції на етапі виготовлення : монографія / М. М. Микийчук ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Вижниця: Черемош, 2014. – 264 с.
29. 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.
30. Ultrasonics - Hydrophones - Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz : IEC 62127-2:2007. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2007. – 172 p.
31. Ultrasonics - Hydrophones - Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields up to 40 MHz : IEC 62127-3:2007. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2007. – 41 p.
32. Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz : IEC 62127-1:2007. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2007. – 166 p.
33. Ultrasonics - Power measurement - Radiation force balances and performance requirements : IEC 61161:2006. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006. – 97 p.
34. Standard Means for the Reporting of the Acoustic Output of Medical Diagnostic Ultrasonic Equipment : IEC 61157:2007. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2007. – 32 p.
35. Ultrasonics - Dental descaler systems - Measurement and declaration of the output characteristics : IEC 61205:1993. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1993. – 31 p.
36. Ultrasonics - Continuous-wave Doppler systems – Test procedures : IEC TS 61206:1993. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1993. – 61 p.

37. Ultrasonics - Hand-held probe Doppler foetal heartbeat detectors - Performance requirements and methods of measurement and reporting : IEC 61266:1994. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1994. – 60 p.
38. Ultrasonics - Real-time pulse-echo systems – Test procedures to determine performance specifications : IEC TS 61390:1996. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1996. – 49 p.
39. Ultrasonics - Flow measurement systems - Flow test object : IEC 61685:2001. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2001. – 36 p.
40. Ultrasonics - Physiotherapy systems – Performance requirements and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz : IEC 61689:1996. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1996. – 112 p.
41. Ultrasonics - Pressure pulse lithotripters - Characteristics of fields : IEC 61846:1998. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1998. – 26 p.
42. Ultrasonics - Surgical systems - Measurement and declaration of the basic output characteristics : IEC 61847:1998. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1998. – 34 p.
43. Ultrasonics - Pulsed Doppler diagnostic systems - Test procedures to determine performance : IEC TS 61895:1999. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 1999. – 32 p.
44. Ultrasonics - Field characterization - Test methods for the determination of thermal and mechanical indices related to medical diagnostic ultrasonic fields : IEC 62359:2005. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2005. – 87 p.
45. Ultrasonics - Focusing transducers - Definitions and measurement methods for the transmitted fields : IEC 61828:2001. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2001. – 103 p.

46. Beissner K. Report on key comparison CCAUV.U-K1 (ultrasonic power) [Electronic Resource] // Metrologia. – 2002. – vol.39 – 73 p. – Mode of access: http://www.bipm.org/utils/common/pdf/final_reports/AUV/U-K1/CCAUV.U-K1.pdf.
47. Acoustical Metrology Programme 2001-2004. – Teddington: NPL, 2001. – 35 p.
48. Acoustical Metrology Programme 2004-2007. – Teddington: NPL, 2004 – 37 p.
49. National Measurement Office Acoustics and Ionising Radiation Strategy. NPL Repprt AC 7 – Teddington: NPL, 2009 – 44 p.
50. Optional Acoustics and Ionising Radiation projects to be carried out between October 2010 and September 2011. – Teddington: NPL, 2010. – 27 p.
51. Приборы медицинские ультразвуковые диагностические эхоимпульсные сканирующие. Общие технические требования. Методы испытаний : ГОСТ 26831-86. – Введ. в дію 27.02.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.
52. Изделия медицинские электротехнические. Часть 2. Частные требования безопасности к аппаратам для ультразвуковой терапии : ГОСТ 30324.5-95 (МЭК 601-2-5-84). – [Чинний від 2002-01-03]. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 12 с. – (Міждержавний стандарт).
53. Излучатели аппаратов для ультразвуковой терапии. Общие технические условия : ГОСТ 25053-87 (СТ СЭВ 2588-80). – [Чинний від 1989-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 29 с. – (Міждержавний стандарт).
54. Приборы медицинские ультразвуковые диагностические. Номенклатура показателей : ГОСТ 4.389-85. – Введ. в дію 01.01.1987. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.
55. Характеристики и градуировка гидрофонов для работы в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц : ГОСТ 8.555-91 (МЭК 866-87). – [Чинний

- від 1992-07-01]. – М.: Изд-во стандартів, 1992. – 33 с. – (Міждержавний стандарт).
56. Чалий В. Створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі / В. Чалий, Т. Ільницька // Метрологія та прилади. – 2012. – № 3. – С. 16–25
57. 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.
58. Чалий В. Єдність і метрологічна простежуваність результатів вимірень потужності ультразвуку / В. Чалий, Т. Ільницька, І. Кізілівський. // Метрологія та прилади. – 2014. – № 5. – С. 5–10.
59. 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.
60. 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.
61. Zieniuk J. Measurement of ultrasonic exposure with radiation force and thermal methods / J. Zieniuk, R.C. Chivers // Ultrasonics. – 1976. – Vol 14. – p. 161–172.

62. Haran M.E. Comparison of an acousto-optic and a radiation force method of measuring ultrasonic power / M.E. Haran, B.D. Cook, H.F. Stewart // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1975. – Vol 57. – p. 1436–1440.
63. Herman B.A. Calibration of miniature receivers using a planar scanning technique / B.A. Herman, G.R. Harris // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1982. – Vol 72. – p. 1357–1363.
64. Shotton K.C. A tethered float radiometer for measuring the output power from ultrasonic therapy equipment / K.C. Shotton, // *Ultrasound Med. Biol.* – 1980. – Vol 6. – p. 131–133.
65. Cornhill C.V. Improvement of portable radiation force balance design / C.V. Cornhill // *Ultrasonics.* – 1982. – Vol 20. – pp. 282–284.
66. Bindal V.N. Measurement of ultrasonic power with a fixed path radiation pressure float method / V.N. Bindal, and A. Kumar // *Acustica.* – 1980. – Vol 46. – p. 223–225.
67. Bindal V.N. On the float method for measuring ultrasonic output / V.N. Bindal, A. Kumar, R.C. Chivers // *Acustica.* – 1983. – Vol 53. – p. 219–223.
68. Aperture-Based Measurement of the Effective Radiating Area of Physiotherapy Treatment Heads: a New Rapid System and Detailed Performance Evaluation (NPL report CMAM 81) / National Physical Laboratory; Mark Hodnett, Pierre Gélat, Bajram Zeqiri. – Teddington, 2002 – 72 p.
69. Thompson S.M. A survey of output characteristics of some new therapeutic ultrasound instruments manufactured in Australia / S.M. Thompson, M.C. Fyfe // *Austral. J. Physiotherapy.* – 1983. – Vol 29, – p. 10–13.
70. Еняков А.М. Разработка методов и средств метрологического обеспечения гидроакустических измерений в диапазоне частот от 0,5 до 15 МГц: автореф. дис. на соискание учен. степени доктора техн. наук : спец. 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение» / А.М. Еняков. – Менделеево, 2007. – 50 с.

71. Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. Розроблення схемо-технічних рішень еталона і основних його складових частин: звіт про ДКР (підетап 1.1) / ДП НДІ «Система»; кер. В.П. Чалий; викон.: Т.М. Ільницька, Е.В. Пасько, О.В. Чобітко. – Львів, 2007. – 57 с. – № ДР 0107U004930.
72. Державна програма розвитку еталонної бази на 2011-2015 роки [Електронний ресурс]: постанова [прийнято Кабінетом міністрів України 22 грудня 2010 № 1165] – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1165-2010-п>.
73. Метрологія. Еталони одиниць вимірювань державні, первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування : ДСТУ 3231:2007. – [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 53 с. – (Національний стандарт України).
74. Красильников В.А. Звуковые и ультразвуковые волны / В.А. Красильников. – М: Физматгиз, 1960. – 560 с.
75. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М: Изд-во Иностранной литературы, 1957. – 726 с.
76. Beissner K. Acoustic radiation pressure in the near field / K. Beissner // *Journal of Sound and Vibration*. – 1984. – Vol 93, № 4. – p. 537–548.
77. Steven E. Fick. In-situ Attenuation Corrections for Radiation Force Measurement of High Frequency Ultrasound With a Conical Target / Steven E. Fick., Dorea Ruggles // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* – 2006. - V.III., №6. – p. 435–442.
78. Beissner K. Minimum target size in radiation force measurements / K. Beissner // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1984. – Vol 76. – pp. 1505-15010.
79. Beissner K. Radiation Force Calculations / K. Beissner // *Acustica*. – 1987. – Vol 62, № 4. – p. 255–263.
80. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов / Лойцянский Л.Г. – [7-е изд., испр.] – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

81. Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. Проведення розрахунків для підтвердження заданих метрологічних характеристик. Розроблення схемо-технічних рішень макетів.: звіт про ДКР (підетап 1.2.) / ДП НДІ «Система»; кер. В.П. Чалий; викон.: Т.М. Ільницька, Е.В. Пасько, В.М. Сіверс. – Львів, 2007. – 44 с. – № ДР 0107U004930.
82. Пьезокерамические преобразователи: справочник / [под ред. С.И. Пугачева]. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
83. Мэзон У.П. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке / У.П. Мэзон; [пер. с англ.]. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1952. – 448 с.
84. Физическая акустика: т. 1. – Методы и приборы ультразвуковых исследований. Ч.А. / [под ред. У.П. Мэзона]. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
85. Улитко А.Ф. К теории колебаний пьезокерамических тел / А.Ф. Улитко // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – К: «Наукова думка», 1975. – № 15. – С. 90–99.
86. Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification – Technical Corrigendum 1 : ISO/TS 14253-2:1999. – Geneva: International Organization for standardization, 1999. – 80 p.
87. Паракуда В.В. Применение метода PUMA 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.
88. Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. Розроблення комплекту документів технічного проекту, в тому числі: розроблення функціональних і принципових схем; розроблення програмного забезпечення для дослідження МХ еталона: звіт про ДКР (підетап 1.5) / ДП НДІ «Система»; кер.

- В.П. Чалий; викон.: Т.М. Ільницька, Е.В. Пасько, В.М. Сіверс, Б.Й. Борис – Львів, 2008. – 42 с. – № ДР 0107U004930.
89. Вимоги до геометричних розмірів виробів. Перевірка вимірювання робочих зразків та засобів вимірювальної техніки. Частина 2. Рекомендації з оцінювання невизначеності вимірів геометричних розмірів виробів, калібрування засобів вимірювальної техніки та контролю виробів (ISO/TS 14253-2:1999, IDT) : ДСТУ ISO/TS 14253-2:2006. – [Чинний від 2007-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 60 с. – (Національний стандарт України).
90. Бочарова А.И. Особенности оценивания неопределенности измерений в стандарте ISO/TS 14253-2 / А.И. Бочарова, С.В. Водотыка, И.П. Захаров // Системи обробки інформації. – 2010. – № 4 (85) – С. 2–6
91. Чалый В.П. Числовые методы оценки неопределенности измерений при калибровке микрофонов на первичном эталоне / Чалый В.П., Паракуда В.В., Колпак Б.Д. // Обучающий семинар КООМЕТ. – Минск: БелГИМ. – 2003. – С.48.
92. Чалий В.П. Методи оцінювання невизначеності первинного акустичного еталона / В.П. Чалий, В.В. Паракуда, М.В. Гайдук // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2004. – №1 – С.43–49.
93. Чалый В.П. Оценивание неопределенности первичного акустического эталона числовыми методами / В.П. Чалый, В.В. Паракуда, Н.В. Гайдук, А.А. Костеров, // Математические методы при обеспечении качества и взаимного признания результатов измерений : тезисы докладов международ. научн.-техн. семинар., (2004 г., г. Санкт-Петербург) – Санкт-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, – 2004. – С.84–87.
94. Чалый В.П. Оценивание неопределенности первичного акустического эталона числовыми методами / В.П. Чалый, В.В. Паракуда, Н.В. Гайдук, А.А. Костеров, // Измерительная техника. – 2005. – № 5. – С.15–19.
95. Чалый В.П. Оценивание неопределенности в измерениях методом Монте-Карло и методом численного дифференцирования / В.П. Чалый,

- А.А. Костеров // Метрология и метрологично осигуряване : сборник доклади XVII-ти Национален научен симпозиум с международно участие., (2007 г., г. Созопол) / Технически университет София. – Изд. “СОФТТРЕЙД”. – София, 2007. – С.36–41.
96. Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method : ISO/IEC Guide 98-3/Suppl.1:2008. – Geneva, 1999. – 88 p.
97. 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.
98. 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.
99. 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 КОOMET-2009 : доклады III Международного конкурса., (14–15 апр. 2009 г., г. Минск) / БелГИМ. – Минск, 2009. – С. 179–185.
100. 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.
101. 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.
102. Jenderka K.-V. BIPM/CIPM key comparison CCAUV.U-K3, ultrasonic power. Technical protocol [Electronic resource] / K.-V. Jenderka, K. Beissner, Ch. Koch. – Braunschweig: PTB, April, 2010. – 9 p. Mode of access:
http://kcdb.bipm.org/appendixB/KCDB_ApB_info.asp?cmp_idy=867&cmp_cod=CCAUV.U-K3&prov=exalead. – Title from the screen.
103. Koch Ch. Final report on key comparison CCAUV.U-K3 for ultrasonic power [Electronic resource] / Ch. Koch, K.-V. Jenderka. // 2014 *Metrologia* 51 09001 - 73 p. Mode of access:
http://kcdb.bipm.org/appendixB/KCDB_ApB_info.asp?cmp_idy=867&cmp_cod=CCAUV.U-K3&prov=exalead. – Title from the screen.
104. Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі. Пояснювальна записка (технічний проект). ДШВК 407259.001 ПЗ / ДП НДІ «Система»; кер. В.П. Чалий; викон.: Е.В. Пасько, Т.М. Ільницька, Ю.М. Старухін, О.П. Донець – Львів, 2008. – 79 с. – № ДР 0107U004930.
105. 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.
106. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей : МИ 2083-90 ГСИ. – Введ. в дію 01.01.1992. – М.: Государственный комитет СССТ по стандартам, 1991. – 7 с.
107. Эталоны. Способы выражения погрешностей : ДСТУ ГОСТ 8.381:2008 ГСИ. – [Чинний від 2008-10-01]. – М. : Государственный комитет СССТ по стандартам, 1980. – 10 с. – (Національний стандарт України).

108. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання маси : ДСТУ 3381:2009. – [Чинний від 2010-02-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 16 с. – (Національний стандарт України).
109. Гирі класів точності E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 і M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування (OIML R 111-1:2004, IDT) : ДСТУ OIML R 111-1:2008 – [Чинний від 2010-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 72 с. – (Національний стандарт України).
110. Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі: звіт про ДКР (заключний) / ДП НДІ «Система»; кер. В.П. Чалий; викон.: Т.М. Ільницька [та ін.]. – Львів, 2008. – 72 с. – № ДР 0107U004930.
111. Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement : ISO/IEC Guide 98-1: 2009. – Geneva, 2009. – 21 p.
112. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) : ISO/IEC Guide 98-3 : 2008. – Geneva, 2008. – 121 p.
113. Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001 IDT) : ДСТУ-Н РМГ 43:2006. – [Чинний від 2007-07-01]. – Мінськ, 2001. – 28 с. – (Національний стандарт України).
114. Захаров И. П. Применение метода Монте-Карло для оценивания неопределенности в измерениях / И.П. Захаров, С.В. Водотыка // Системи обробки інформації. – 2008. – Вип. 4. – С. 34–37.
115. Новиков В.В. Оцінювання невизначеності методом Монте-Карло: стан, проблеми, перспективи / В.В. Новиков. // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 1. – С. 156–161.

116. Новиков В.В. Чисельные методы в вычислениях неопределенности / В.В. Новиков [Электронный ресурс]. – 3 с. – Режим доступа: http://www.euroacademia.com.ua/attachment.php?owner_id=44&name=Uncertainty_Numerical_methods.pdf – Назва з екрана.
117. Ильницкая Т.М. Применение метода Монте-Карло для оценивания неопределенности ультразвукового эталона / Т.М. Ильницкая, В.П. Чалый, А.А. Костеров // Системи обробки інформації. – 2012. – № 1 (99). – С. 108–112.
118. Pnytska T. Investigation of metrological characteristics of the measurement standard of ultrasound power unit in water medium / T. Pnytska // Sustainable development. – 2015. – Vol. 3 (24). – P. 102–107.
119. 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.
120. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005, IDT) : ДСТУ ІЕС/ISO 17025:2006 – [Чинний від 2007-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 32 с. – (Національний стандарт України).
121. EA-4/07 M (EAL-G2) Traceability of Measurement and Test Equipment to National Standards [Electronic Resource]. – 16 p. – Mode of access : <http://www.european-accreditation.org/publication/ea-4-07-m> – Title from the screen.
122. ILAC P10:01/2013 ILAC Policy on Traceability of Measurement Results [Electronic Resource]. – 10 p. – Режим доступу: <http://ilac.org/publications-and-resources/ilac-documents/procedural-series/> – Title from the screen.

Додаток А

Оцінка необхідних ресурсів для створення еталона та вибір обладнання

Відповідно до адаптивного методу викладеного у розділі 3 дисертаційної роботи на кожній ітерації оцінювали, щоб ресурси необхідні на створення еталона не перевищували виділений ліміт. Оцінювання необхідних ресурсів проводились лише у розрізі затрат на придбання або виготовлення необхідного обладнання та основних частин еталона.

Для придбання спецустаткування в рамках дослідно-конструкторської роботи «Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі», яка виконувалась у 2007-2010 рр., були заплановані кошти в сумі 190,2 тис. грн.

У таблицях А.1-А.3 подано розрахунок ресурсів необхідних для створення еталона на кожній ітерації відповідно. При виборі типу обладнання враховували його технічні характеристики, похибки та ціну. Короткі відомості про основне необхідне обладнання з характеристикам та цінами станом на серпень 2007 року подано в таблицях А.4-А.12.

Таблиця А.1 – Ресурси необхідні для створення еталона. Перша ітерація

Найменування	Тип	Ціна станом на 28.08.2007 р., грн.	Примітка
Генератор	AFG3021	15 030	
Підсилювач потужності	325LA	44 945	
Ультразвуковий випромінювач, комплект		40 000	Орієнтовна вартість виготовлення власними силами
Бак з мішенню	«ИМУ-Квант»	8 470	Вимірювач потужності ультразвуку
Вага			
Різноважки, комплект	клас F1	3 110	
Комп'ютер		5 046	
Дистилятор	ДЭ4-02	2 580	
Барометр, термометр, гігрометр		1 000	
Всього		120181	

На першій ітерації для створення еталона були необхідні ресурси на суму 120,2 тис.грн., що не перевищило виділеного ліміту в 190,2 тис.грн.

Таблиця А.2 – Ресурси необхідні для створення еталона. Друга ітерація

Найменування	Тип	Ціна станом на 28.08.2007 р., грн.	Тип	Ціна станом на 28.08.2007 р., грн.	Примітка
Генератор	AFG3021	15 030	AFG3021	15 030	
Підсилювач потужності	325LA	44 945	325LA	44 945	
Ультразвуковий випромінювач, комплект		40 000		40 000	Орієнтовна вартість виготовлення власними силами
Бак з мішенню		2 462,5		2 462,5	
Вага	MX-5 Mettler Toledo	135 784	XA 60 Radwag	20 460	
Вольтметр	B3-52/1	2 244	B3-52/1	2 244	
Різноважки, комплект	клас F1	3 110	клас F1	3 110	
Комп'ютер		5 046		5 046	
Система водопідготування		3 580		3 580	Дистилятор ДЭ4-02, кип'ятильник, дагазатор
Термометр для вимірювання температури води		100		100	Спиртовий
Барометр, термометр, гігрометр	TESTO	5 000	TESTO	5 000	
Система захисту від вібрацій		1 600		1 600	
Всього		258 901,5		143 577,5	

На другій ітерації при розрахунку вибрано прецизійну вагу MX-5 фірми Mettler Toledo з ціною поділки 0,001 мг. Але ресурси необхідні для створення еталона перевищили виділений ліміт на 68,7 тис.грн. Тому для зменшення вартості було вибрано ваги XA 60 Radwag з ціною поділки 0,01 мг. У цьому випадку необхідні ресурси 143,6 тис.грн. не перевищили виділений ліміт у 190,2 тис.грн.

Таблиця А.3 – Ресурси необхідні для створення еталона. Третя ітерація

Найменування	Тип	Ціна станом на 28.08.2007 р., грн.	Тип	Ціна станом на 28.08.2007 р., грн.	Примітка
Генератор	AFG3021	15 030	AFG3021	15 030	
Підсилювач потужності	A150	49 995	A150	49 995	
Ультразвуковий випромінювач, комплект		40 000		40 000	Орієнтовна вартість виготовлення власними силами
Бак з мішенню		2 462,5		2 462,5	
Вага	XA 60 Radwag	20 460	XA 60 Radwag	20 460	
Вольтметр	8508A Fluke	113 435	BK3-61A	5 743	
Різноважки, комплект	клас F1	3 110	клас F1	3 110	
Комп'ютер		5 046		5 046	
Осцилограф	GDS 840C	12 781	GDS 840C	12 781	
Частотомір	ЧЗ-81-1	1 900	ЧЗ-81-1	1 900	
Система водопідготовки		3 580		3 580	Дистилятор ДЭ4-02, кип'ятильник, дагазатор
Киснемір з термометром для води		3 000		3 000	
Барометр, термометр, гігрометр	TESTO	5 000	TESTO	5 000	
Система захисту від вібрацій, шумів та повітряних потоків		6 500		6 500	З захисним кожухом
Всього		282 299,5		174 607,5	

На третій ітерації для розрахунку спочатку було вибрано еталонний вольтметр 8508A Fluke. Але тоді ресурси необхідні для створення еталона значно перевищили виділений ліміт. Тому для зменшення вартості обрали вольтметр BK3-61A. У цьому випадку необхідні ресурси 174,6 тис.грн. не перевищили виділений ліміт у 190,2 тис.грн.

Таблиця А.4 – Генератори. Основні характеристики.

Модель	Технічні і метрологічні характеристики				Ціна станом на 28.08.07 р.. грн.
	частотний діапазон	основна похибка установки частоти	інші	вага, кг	
Г4-154	100кГц – 50МГц	±0,01%	нестабільність частоти за 15 хв. $\pm 1 \cdot 10^{-5}f$; вихід 12 В на 50 Ом; АМ, ДУ	10,5	6288,00
Г4-158А	10 кГц-100МГц	±0,001%	вихід 2 В на 50 Ом; АМ, ДУ	10,5	4325,00
Г4-164	100 кГц-640 МГц		нестабільність частоти $\pm 0,5 \cdot 10^{-7}f$; пам'ять на 11 груп органів керування, мікропрц.кер.; АМ, ЧМ, ИМ	22	15841,00
Г4-176	100 кГц-1020 МГц	±0,000015%	нестабільність частоти $\pm 0,5 \cdot 10^{-7}f$; пам'ять на 11 груп органів керування, мікропрц.кер.; АМ, ЧМ, ИМ, ТВ-модуляція.	24	24526,00
Г4-218 (SG-1710)	200 кГц-1000 МГц	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$	нестабільність частоти $\pm 1,5 \cdot 10^{-7}$; вих. рівень -127...13дБм (розподільча здатність 1 Гц) на 50 Ом; захист виходу до 25 Вт Макс.; внут. і зовн. АМ/ЧМ; цифрова індикація; пам'ять до 300 профілів; GPIB, RS-232C	14	25901,00
ГСС-20 ГСС-20/1	1мкГц-20 МГц	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$ ($\pm 1 \cdot 10^{-7}$ ГСС-*/1)	використання прямого цифрового синтезу; розподільча здатність 1 мкГц; амплітуда вихідного сигналу від 100 мкВ до 10 В пік на 50 Ом; більше 30 видів форм вихідного сигналу; вбудований частотомір (до 100 МГц); GPIB, RS-232; модуль формування сигналів довільної форми.	2,5	6396,00
ГСС-40 ГСС-40/1	1мкГц-40 МГц				7417,80
WW5061 1 канал	0,1 мГц-25 МГц	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$	вихідний сигнал: синус, трикутник, меандр, імпульс, пила, Sin X/X, гаусівський і експоненціальний, шум, постійна напруга, довільна форма; вихідний рівень від 10 мВ до 10 В пік на 50 Ом; АМ, ЧМ, ФМн, ЧМн, ИМ, ГКЧ, 3D, IQ; синхронізація: автоматична, ручна, зовнішня, мультигенераторна; вбудований частотомір (до 100 МГц); USB, LAN, GPIB; ПЗ для формування сигналів довільної форми.	3	17638,00
WW5062 2 канали					26352,00
AFG3021 1 канал	1 мГц-25 МГц	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$	вихідний сигнал: синус, трикутник, меандр, імпульс, пила, Sin X/X, зростаюча та спадаюча експонента, функції Гауса, Лоренцо, Хевисайда, шум; вихідний рівень від 10 мВ до 10 В на 50 Ом; АМ, ЧМ, ФМн, ЧМн, ИМ, ГКЧ; роз'єм USB на передній панелі для збереження даних; USB, LAN, GPIB; ПЗ для формування сигналів довільної форми; дисплей 5,6''	4,5	15030,14
AFG3022 2 канали					22760,69

При складанні таблиць А.4, А.10, А.11 як джерела інформації було використано дані взяті з мережі Інтернет, зокрема, веб-сайти фірм «Елкос» (www.elkos.com.ua), АО «Прист» (www.prist.com), «Тевало Україна» (www.tevalo.com.ua), «Харьков-Прибор» (www.pribory.com), «Западприбор» (www.zapadpribor.com), ООО Принцип (www.printsip.ru), www.szmatrix.com, www.digitalscopes.net та інші.

Таблиця А.5 – Підсилювачі потужності. Основні характеристики.

Модель	Технічні і метрологічні характеристики					Ціна, станом на 28.08.07 р.
	частотний діапазон	основна похибка підсилення	вихідний піковий рівень	інші	вага, кг	
9250 Tabor Electronics	до 15 МГц (великий рівень)	±3% (на 1 кГц)	20 В	2 несиметр. або 1 диференц. канал; вхідний опір 50 Ом, 75 Ом або 1 МОм; вихідний опір 50 Ом, 75 Ом або 600 Ом; коеф. підсилення 10		84901 руб.
	до 30 МГц (малий рівень)					
BBSOAZERR	0,01 МГц – 175 МГц		500 Вт	приріст потужності 56 дБ, робочий вольтаж 180-260 В, вхідний/вихідний опір 50 Ом.	38,5	
BVMOAZERR	0,01 МГц – 175 МГц		500 Вт	приріст потужності 56 дБ, робочий вольтаж 26-30 В, вхідний/вихідний опір 50 Ом.	18	
У3-33	0,05 МГц – 400 МГц		Коефіцієнт підсил. – не менше 25 дБ	Вхідний/вихідний опір 50 Ом, КСВН не більше 2 (20-400 МГц), коефіцієнт шуму - не більше 10 дБ		9500 руб.
У3-29	50 Гц – 20 МГц		коефіцієнт підсил. – 46 дБ	нерівномірність АЧХ – 2 дБ, мах. вихідна напруга – 1 В, вихідний опір з вихідним кабелем – 400 кОм (1 кГц)	14	14500 руб.
325LA	250 кГц – 150 МГц	± 1,5 дБ	20 Вт	коефіцієнт підсил. – 50 дБ; рівень гармонік -23 дБ	9	8900 USD
A150	300 кГц – 35 МГц	± 1,5 дБ	150 Вт	коефіцієнт підсил. – 55 дБ; рівень гармонік -25 дБ	21,8	9900 USD

Ультразвукові випромінювачі для еталонів не випускалися; існували лише датчики до ультразвукових сканерів, які працюють і на передачу і на прийом та використовуються при діагностиці в медичних закладах. Тому

вирішено провести власну розробку ультразвукового випромінювача. У таблиці А.6 як приклад взято датчики до ультразвукових сканерів ALOKA SSD-500, 900, 1000, 1700, 3500, 4000, 5000.

Таблиця А.6 – Датчики до ультразвукового сканера ALOKA.

Назва	Короткий опис	Ціна станом на 01.08.07, \$
UST-934N-3,5	Датчик конвексний абдомінальний 3,5 МГц	2500
UST-935N-5	Датчик конвексний педіатричний 5 МГц	4290
UST-944В-3,5	Датчик мікроконвексний кардіологічний 3,5 МГц	3270
UST-945 ВР-5	Датчик мікроконвексний транвагінальний 5 МГц	4360
UST-5024N-3,5	Датчик лінійний 3,5 МГц	3170
UST-5711-7,5	Датчик лінійний для малих органів 7,5 МГц	4280
UST-5512 U-7,5	Датчик лінійний для малих органів 7,5 МГц	3540
UST-586-5	Датчик лінійний педіатричний 5 МГц	4100
UST-660-7,5	Датчик лінійний трансректальний 7,5 МГц	5320
UST-974-5	Датчик конвексний неонатальний 5 МГц	4530
UST-9112-5	Датчик транвагінальний 5 МГц	7300
UST-5710-7,5	Датчик лінійний для малих органів 7,5 МГц	5300
UST-5524-7,5	Датчик лінійний для судинних досліджень 7,5 МГц	7900
UST-5299	Датчик електричний секторний від 2,1 до 3,8 МГц	6500

Таблиця А.7 – Вимірювачі потужності ультразвуку. Основні характеристики.

№ п/п Модель	Виробник	Технічні характеристики					Ціна, станом на 28.08.07 р..
		частотний діапазон, МГц	діапазон потужності, Вт	дискетність	Похибка приладу, Вт (для 1 та 2) Відносна похибка вимірів, % (для 3 та 4)	вага, кг	
Метод з використанням електронної ваги							
ИМУ-КВАНТ	«Завод «КВАНТ», Україна	0,5-10	0,05-30	0,05 Вт	$\pm(0,03P+0,05)$ Вт (приладу)	8	8470,00 грн.
UPM-DT-1AV	Ohmic Instruments Company, США	0,5-10	0-30	0,002 Вт	$\pm 3\%$ @ 10 Вт, 25°C (приладу)	14	4270\$ (Biomed Equip) 4510\$ (Ohmic)
Метод з використанням срібних ланцюжків							
ИМУ-1ПМ	ФГУП «ВНИИФТРИ»Росія	0,5-12	0,01-3	1 мм	100[0.003+0.07P]/P	12	166800 руб.
ИМУ-1ПМ-01			0,05-12				
ИМУ-2ПМ	ФГУП «ВНИИФТРИ»Росія	0,5-12	0,01-3	1 мм	100[0.003+0.07P]/P	5	64800 руб
ИМУ-2ПМ-01			0,05-12				

При складанні таблиці А.7 як джерела інформації було використано дані взяті з мережі Інтернет, зокрема, веб-сайти фірм «Завод «Квант»

(kvant.in.ua), Ohmic Instruments Company (www.ohmicinstruments.com), BiomedEquip (www.biomedequip.com), ФГУП ВНИИФТРИ, «Измерительный прибор» (www.hardandsoft.ru) та інші.

Таблиця А.8 – Ваги. Основні характеристики.

Модель, фірма-виробник	Технічні характеристики					Ціна, станом на 1.08.07 р., євро
	кількість діапазонів зважування	ціна поділки, мг	макси- мальна вага, г	тип калібру- вання	клас точності, ГОСТ 24104-2001	
ME 5 Sartorius	1	0,001	5,1	самокалібр.	I	21508
ME 235P Sartorius	3	0,01/ 0,02/ 0,05	60/ 110/ 230	самокалібр.	I	10306
SE 2 Sartorius	1	0,0001	2,1	самокалібр.	I	24247
MC 21S Sartorius	1	0,001	21	самокалібр.	I	17589
CP 225D Sartorius	2	0,01/ 0,1	80/ 210	автоматичне	I	6075
MX-5 Mettler Toledo	1	0,001	5,1	самокалібр.	I	19622
XP-105DR Mettler Toledo	2	0,01/ 0,1	31/ 120	самокалібр.	I	8127
XP-205DR Mettler Toledo	2	0,1/ 0,	81/ 220	самокалібр.	I	10130
XP-205 Mettler Toledo	1	0,1	220	самокалібр.	I	11585
AUW 120D Shimadzu	2	0,01/ 0,1	42/ 120	самокалібр.	I	2825
AUW 220D Shimadzu	2	0,01/ 0,1	82/ 210	самокалібр.	I	3110
AP 250D Ohaus	2	0,01/ 0,1	50/ 210	самокалібр.	I	3070
DV 215CD Ohaus	2	0,01/ 0,1	81/ 210	самокалібр.	I	3070
GR 202 A&D	2	0,01/ 0,1	42/ 210	самокалібр.	I	120820 руб.
GH 202 A&D	2	0,01/ 0,1	52/ 220	автоматичне	I	123620 руб.
XA 110 Radwag	1	0,01	100	самокалібр.	I	99200 руб.
XA 60/220 Radwag	2	0,01/ 0,1	60/ 220	самокалібр.	I	102300 руб.

При складанні таблиці А.8 як джерела інформації було використано дані взяті з мережі Інтернет, зокрема, веб-сайти www.sartogsm.ru, www.acomrus.ru, www.albalances.ru, ООО «ДКЛ» (www.dkl.com.ua), Меттлер-Толдео Україна (www.mtrus.com) та інші.

При складанні таблиці А.9 використані дані з прайс-листа фірми «Приорітет».

Таблиця А.9 – Конфігурації персонального комп'ютера.

Тип	Назва	Ціна станом на 01.08.2007р., грн	Гарантія, міс.
1 варіант			
Процесори / CPU	AMD Athlon 64 X2 3600 Socket AM2 Box двохядерний	461,10	36.00
Материнські плати / Mother Boards	Socket AM2:Asus M2V-MX (VIA® K8M890/DDR2/VGA/PCI-E/SATA-Raid/IDE/Lan)	339,20	36.00
Жорсткі диски / HDD	Western Digital 80 Gb 7200 WD800JD 8MB SATA	249,10	36.00
Оптичні приводи CD/DVD – ROM/RW	DVD±R/RW Lite-On DW1650-488C (8801)	151,05	12.00
Дисководи / FDD	FDD Alps	34,45	12.00
Пам'ять / Memory	DDR2 512Mb DDR667 AM1	121,90	24.00
Пам'ять / Memory	DDR2 512Mb DDR667 AM1	121,90	24.00
Пам'ять / Memory	USB Flash 1 Gb Kingston	63,60	12.00
Корпуса / Блоки живлення	COLORSIT L8009-A1 PFC USB/Audio 350W white	185,50	6.00
Клавіатури	Клавіатура Sven Slim 303 PS/2	21,20	3.00
Миші, килимки	Мишка оптична Sven L-12 PS/2 3D, 2+1 клавіші, 1 колесо, рограмм., ергономічна	21,20	3.00
Монітори	Монітор AKYGA 19" W28 wide 8msec 1440*900	1171,30	12.00
Мережеві фільтри – подовжувачі	Мережний фільтр Proxima 5 m	29,15	6.00
Програмне забезпечення	Windows XP Home Edition OEM Rus	360,40	
Програмне забезпечення	MS Office 2007 Basic Russian (MLK)	1335,60	
Всього		4666,65	

Продовження табл. А.9

Тип	Назва	Ціна станом на 01.08.2007р., грн	Гарантія, міс.
2 варіант			
Процесори / CPU	Intel:Core 2 Duo 1,8GHz/2MB/800 BOX (LGA775) #E4300	795,00	36.00
Материнські плати / Mother Boards	Socket 775:Asus P5GC-MX (Intel® 945GC/DDR2/VGA Intel/PCI-E/SATA2/Lan/mATX)	381,60	36.00
Жорсткі диски / HDD	Western Digital 80 Gb 7200 WD800JD 8MB SATA	249,10	36.00
Оптичні приводи CD/DVD - ROM/RW	DVD±R/RW Lite-On DW1650-488C (8801)	151,05	12.00
Дисководи / FDD	FDD Alps	34,45	12.00
Пам'ять / Memory	DDR2 512Mb DDR667 AM1	121,90	24.00
Пам'ять / Memory	DDR2 512Mb DDR667 AM1	121,90	24.00
Пам'ять / Memory	USB Flash 1 Gb Kingston	63,60	12.00
Корпуса / Блоки живлення	COLORSIT L8009-A1 PFC USB/Audio 350W white	185,50	6.00
Клавіатури	Клавіатура Sven Slim 303 PS/2	21,20	3.00
Миші, килимки	Мишка оптична Sven L-12 PS/2 3D, 2+1 клавіші, 1 колесо, програм., ергономічна	21,20	3.00
Монітори	Монітор AKYGA 19"W28 wide 8msec 1440*900	1171,30	12.00
Мережеві фільтри - подовжувачі	Мережний фільтрProxima 5 m	29,15	6.00
Програмне забезпечення	Windows XP HomeEdition OEM Rus	360,40	
Програмне забезпечення	MS Office 2007 Basic Russian (MLK)	1335,60	
Всього		5042,95	

Таблиця А.10 – Вольтметри. Основні характеристики.

Модель, фірма-виробник	Технічні характеристики					Ціна станом на 28.08.07 р, грн.
	частотний діапазон	діапазон напруги	Основна похибка, %	інші	вага, кг	
V3-49	20Гц-1ГГц	10 мВ-100 В	$\pm(0,2+0,08/U_x+0,008f)$	прецизійний, при використанні атестованих діодів $\pm(0,2+0,08/U_x+0,0035f)$	20	5743
V3-52/1	10 кГц-1000 МГц (з проб.)	1 мВ-300 В (з подільн.)	$\pm(4-15)$		3,8	2244

Продовження табл. А.10

Модель, фірма- виробник	Технічні характеристики					Ціна станом на 28.08.07 р, грн.
	частотний діапазон	діапазон напруги	Основна похибка, %	інші	вага, кг	
B3-63	10 Гц- 1500 МГц	0,01 В - 100 В	0,05-2	5 розрядів, КОП		26765
BK3-61A	20 Гц – 50 МГц	10 мВ- 1000 В	0,4-10		6	13200 руб.
B6-10	100 кГц- 30 МГц	0,01 В – 1000 В	0,4-0,8	селективний	10	4100
B7-37	до 1 ГГц	0,01 В – 1000 В	0,25			1811
B7-40/1	20 Гц- 100 кГц (до 1 ГГц ВЧ пробн)	2 мВ - 1000 В		10 МО-20 МОм, індик. 4 ½ розряди, КОП	5,5	5416
B7-53	20 Гц- 100 кГц (до 1 ГГц ВЧ пробн)	1 мВ – 700 В	0,04	1 МОм-2 ГОм, індикація 5 ½ розрядів, математична обробка результатів., КОП	3,2	6125
B7-53/1	20 Гц- 100 кГц (до 1 ГГц ВЧ пробн)	1 мВ – 700 В	0,04	1 МОм-2 ГОм, індикація 5 ½ розрядів, математична обробка результатів.	3,5	4814
B7-64/1	до 700 МГц	до 1000 В	0,005	опір до 1 МОм		45775 руб.
8508A Fluke	100 кГц – 1 ГГц	0 В – 1050 В		еталонний прилад, 0 Ом-20 ГОм, стабільність 0,0003 % за год., 8.5 розрядів, GPIB	8,1	567175 руб.
92EA Boonton Electronics	10 Гц – 1,2 ГГц	200 мкВ – 3 В (до 300 В з подільн.)	1-3		3,2	120115 руб.
MS-9150N METEX 1191150	1 Гц – 2,7 ГГц	400 мВ – 750 В	±(2,5%+5)		17,7	

Таблиця А.11 – Осцилографи. Основні характеристики.

Модель, фірма- виробник	Технічні характеристики					Ціна,грн. станом на 28.08.07 р.
	частотний діапазон	кількість каналів	похибка , %	інші	вага, кг	
GOS-6030 Good Will	30 МГц	2	±3	аналоговий, 6-ти розрядний частотомір	7,2	4044
GOS-6031 Good Will	30 МГц	2	±3	аналоговий, 6-ти розрядний частотомір, запам'ятовування і виклик 10 станів органів керування	7,2	5095

Продовження табл. А.11

Модель, фірма- виробник	Технічні характеристики					Ціна, грн. станом на 28.08.07 р.
	частотний діапазон	кількість каналів	похибка , %	інші	вага, кг	
GOS-620 Good Will	20 МГц	2	±3	аналоговий, чутливість 1 мВ/діл. ТВ-синхронізація, модуляція яскравості променя	8	3014
GOS-620FG Good Will	20 МГц (генератор 0,1Гц – 1МГц)				8,5	3565
GOS-622G Good Will	20 МГц	2	±3	аналоговий, режим X-Y	8,2	3601
GDS-2062 Good Will	60 МГц	2	±3	цифровий; +, -, /, x, БПФ; кольоровий дисплей, USB, RS232C, GPIB (опція), ПЗ, опція живлення від батареї	4,3	6834
GDS-2064 Good Will		4				8731
GRS-6032 Good Will	30 МГц	2	±3	аналогово-цифровий, резолюція 8 біт	8,5	5880
GDS-806C Good Will	60 МГц	2 (кольор.)	±0,01	цифровий, частотомір (10 Гц-150МГц), БПФ, USB, RS232C, GPIB (опція),	4,1	6911
GDS-806S Good Will		2 (ч/б)				5732
GDS-840C Good Will	250 МГц	2 (кольор.);	±3 (відхил.)	похибка ±0,01 (розгорт); вбудований частотомір (розд.здатн. 6 розр., похибка 2%), БПФ; RS- 232C, USB	4,1	12781
TDS 1001 Textronix	40 МГц	2	±3	цифровий, БПФ, RS-232, GPIB, Centronics, LAN/WAN	3,6	5309
АСК-7022 Актаком	20 МГц	2	2	аналоговий, 5-розрядний частотомір, ТВ- синхронізація	8,5	4962
АСК-7042 Актаком	40 МГц				7,5	7028
АСК-2024 Актаком	20 МГц	2	+2	цифровий, 8 біт, БПФ, USB, RS232, Centronics	1,35	30600 руб.
АСК-2021 Актаком	20 МГц	2	±3	аналого-цифровий	8,5	6625
АСК-2031 Актаком	30 МГц			аналого-цифровий, RS232		8384
АСК-2025 Актаком	25 МГц	2		цифровий,		24300 руб.
АСК-22020 Актаком	20 МГц	2	±3	аналого-цифровий, RS232	8,5	9063
АСК-24020 Актаком	20 МГц	2	±3	аналоговий	7,4	3621
MDS-620 Matrix	20 МГц	2	±3	аналоговий, резолюція 8 біт вертикальна і 10 біт горизонтальна, чутливість 1 мВ/поділ, RS-232	8	4452
MOS-620 Matrix	20 МГц	2	≤3	аналоговий, чутливість 1 мВ/поділ,	8	2203
MOS-620FG Matrix	20 МГц (40 МГц частотомір)					13052 руб.

Продовження табл. А.11

Модель, фірма- виробник	Технічні характеристики					Ціна, грн. станом на 28.08.07 р.
	частотний діапазон	кількість каналів	похибка , %	інші	вага, кг	
MOS-626F Matrix	20 МГц	2	≤3	аналоговий, функція вимірювання частоти	8	3290
MOS-640 Matrix	20 МГц	2	≤3	аналоговий, чутливість 1 мВ/поділ,	8	3545
MOS-640FG Matrix	20 МГц (40 МГц частотом ір)					3800
C1-131-1	25 МГц	2		аналоговий		4721
C1-131-2	25 МГц	2		аналого-цифровий,	4,5	5406
C1-137	25 МГц	2	4	аналоговий	5	5508
C1-137-1	25 МГц	2	4	аналоговий, вбудований мультиметр	5	5569
C1-137-2	25 МГц	2		аналого-цифровий, RS-232, режим самописця	5,5	9792
C1-151	35 МГц	2	5	аналоговий,	3,7	4284
C8-33	20 МГц	2	2,5	цифровий, КОП/RS	8	14688
DS5022M Rigol	25 МГц	2	±3	цифровий, +, -, x, /, БПФ	4,5	3448
DS1022C Rigol	25 МГц	2		цифровий, +, -, x, /, БПФ, вбудований частотомір, USB, RS232	2,3	5610
U1604A Agilent	40 МГц	2	3	цифровий, мультиметр (TRMS), +, -, БПФ, USB	1,5	61930 руб.

Таблиця А.12 – Дистилятори. Основні характеристики.

Модель, фірма-виробник	Технічні характеристики				Ціна, грн. станом на 28.08.07 р.
	продуктивність, л/год	напруга живлення, В	споживана потужність, кВт	вага, кг	
2	3	4	5	6	7
ДЕ-4-02 (ЕМО) Санкт-Петербург	4±10%	220±10%	3,6±10%	14	2850,00
ДЕ-4 Тюмень	4	220	3,5	10	3500,00
ДЕ-5 ЛИВАМ	5±10%	220	3,6±10%	15,9	4100,00
ДЕ-5, нержавійка Данія	5	220	4,5	8,5	2700,00

Додаток Б
Методика атестації еталон одиниці потужності ультразвуку
у водному середовищі.



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
МЕТРОЛОГІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ І УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ»
(ДП НДІ «СИСТЕМА»)

ВТОРИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ
У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ. МЕТОДИКА АТЕСТАЦІЇ

ВЕТУ 10-169-01-11

ДШВК 407259.001 МА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Т.в.о. директора
ДІПНД "СИСТЕМА"



М.п. Басараб

20__ р.

**ВТОРИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ
У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ. МЕТОДИКА АТЕСТАЦІЇ**

ВЕТУ 10-169-01-11

ДШВК 407259.001 МА-АУ

Головний науковий співробітник

В.П. Чалий
" 27 " 10 2010 р.

Науковий співробітник

Т.М. Ільницька
" 27 " 10 2010 р.

З М І С Т

	с.
Вступ	4
1 Розгляд технічної документації	4
2 Способи нормування та форми подання характеристик точності.....	5
3 Експериментальні дослідження	8
3.1 Умови атестації	8
3.2 Вимоги безпеки під час проведення атестації	8
3.3 Перелік операцій експериментальних досліджень	8
3.4 Засоби атестації	9
4 Методи експериментальних досліджень	10
4.1 Зовнішній огляд еталона	10
4.2 Випробовування апаратури еталона	11
4.3 Визначення метрологічних характеристик еталона	11
4.3.1 Визначення метрологічних характеристик ультразвукового вимірювального блока.....	11
4.3.2 Визначення метрологічних характеристик ультразвукових випромінювачів.....	12
4.3.3 Визначення метрологічних характеристик вимірювального каналу еталона.....	16
5 Опрацювання результатів дослідження.....	16
6 Оформлення та подання результатів атестації	20
Бібліографія	20
Додаток А Форма таблиць набору даних результатів експериментальних досліджень під час атестації.....	21
Додаток Б Форма протоколу атестації вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.....	26

ВСТУП

Ця методика атестації (МА) поширюються на вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі ДШВК 407259.001 і встановлюють зміст та методика атестації.

МА розроблена на основі нормативних документів [1-7] з врахуванням рекомендацій [8-9].

Завданням атестації відповідно до ДСТУ 3215 [1] є визначення та встановлення відповідності метрологічних характеристик еталона вимогам ТЗ і нормативним документам [2, 5] та встановлення придатності еталона до застосування.

1 РОЗГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Перелік вимог до технічної документації на вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі, їх зміст та методи перевірки викладені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Перелік вимог до технічної документації, їх зміст та методи перевірки

Перелік вимог, які необхідно перевірити під час розгляду технічної документації	Зміст вимог та методика їх перевірки під час розгляду технічної документації
Перевірка відповідності метрологічних та технічних характеристик еталона, наведених у технічній документації, вимогам ТЗ	Перевіряється відповідність метрологічних та технічних характеристик еталона, наведених у настанові з експлуатації (НЕ), паспорті, правилах зберігання і застосування, вимогам технічного завдання (ТЗ) на еталон
Перевірка повноти, правильності нормування та способу подання метрологічних характеристик еталона	Оцінюється відповідність метрологічних характеристик, що містяться в НЕ, паспорті, відомостях про еталон, вимогам ДСТУ ГОСТ 8.381 [5], ДСТУ 3231 [2]
Оцінка експлуатаційних документів з точки зору зручності користування ними споживачем	Оцінюється повнота та зручність у користуванні експлуатаційними документами на еталон

2 СПОСОБИ НОРМУВАННЯ ТА ФОРМИ ПОДАВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТІ

Відповідно до чинних нормативних документів [3, 5] та вимог ТЗ метрологічні характеристики (МХ) вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку (ОПУз) у водному середовищі повинні представлятися невиключеною систематичною похибкою, випадковою похибкою та нестабільністю і подаватися у вигляді довірчих границь похибки $t_{\Sigma}S_{\Sigma}$ з довірчою імовірністю 0,99, СКВ результату вимірювання при передаванні ОПУз та зміною розміру одиниці за визначений проміжок часу.

Крім того необхідно оцінювати невизначеність у вимірюванні на еталоні, яка згідно з [10] подається як розширена невизначеність з коефіцієнтом розширення 2, що відповідає рівню довірчої імовірності 0,95.

Вимірювання, що виконують на еталоні, є опосередкованими, тому оцінювання похибок їх результатів необхідно проводити відповідно до [7, 10] (див. розділ 4) на підставі рівняння вимірювання (модельної функції).

Вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку ВЕТУ10-169-01-11 виконаний за схемою первинного еталона і крім зберігання і передавання одиниці вимірювання робочим засобам вимірювання за допомогою робочих еталонів відповідно до локальної повірочної схеми ЛПУ 10-01-2011 здатний відтворювати одиницю потужності ультразвуку первинним методом. Тому еталон ВЕТУ10-169-01-11 може функціонувати принаймні у трьох режимах:

- у режимі відтворення значення одиниці вимірювання потужності ультразвуку (ОПУз) первинним методом;
- у режимі зберігання ОПУз, одержаної від первинного (зарубіжного еталона);
- у режимі передавання значення ОПУз, тобто повірки/калібрування підлеглих засобів вимірювання (ЗВ) – робочих ЗВ.

Модельна функція і номенклатура метрологічних характеристик еталона залежить від режиму функціонування еталона.

У режимі відтворення значення ОПУз первинним методом **Фізична модель**

Відповідно до принципу дії еталона ВЕТУ10-169-01-11, викладеному в настановах з експлуатації, ультразвуковий резонансний випромінювач (УзВ), занурений активною частиною у воду вимірювального бачка ультразвукового вимірювального блока, випромінює під дією збуджуючого електричного сигналу, який подається від генератора на частоті резонансу УзВ через підсилювач потужності, ультразвуковий промінь, направлений на мішень, підвішену на шальках електронних цифрових терезів. У результаті взаємодії ультразвукового променя з мішенню на мішень діє радіаційна сила, пропорційна випромінюваній ультразвуковій потужності. Радіаційна сила

вимірюється терезами. За результатами вимірювання радіаційної сили визначається потужність ультразвукового випромінювання.

Математична модель

Потужність ультразвукового випромінювання, яка визначається за результатами вимірювання радіаційної сили, що діє на абсорбуючу мішень, обчислюється за формулою:

$$P = c \cdot F \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) \left(1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka) \right)^{-1} \cdot P; \quad (2.1)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.2)$$

де F – радіаційна сила, що діє на мішень;

c – швидкість звуку у воді;

J_n - функція Бесселя 1-го роду порядку n ;

a – радіус активного елемента УзВ;

k – хвильове число;

λ - довжина акустичної хвилі;

f – частота збуджуючого сигналу;

P – поправки.

У режимі зберігання ОПУз, одержаної від первинного еталона

Фізична модель

У цьому режимі комплект еталонних УзВ спочатку калібрують (повіряють) на первинному (зарубіжному) еталоні, відповідно до експлуатаційних документів на даний еталон: у діапазоні робочих напруг визначають електроакустичну провідність на частоті резонансу та приписують її кожному разом з відповідними характеристиками точності. Потім, за результатами визначення електроакустичної провідності УзВ калібрують вторинний еталон: на частоті резонансу кожного УзВ подають відповідну напругу збудження і вимірюють потужність ультразвуку, випромінюваного ультразвуковим вимірювальним блоком еталона.

Математична модель

Електроакустична провідність G :

$$G = \frac{P_n}{V_n^2}, \quad (2.3)$$

де P_n – значення вихідної потужності ультразвуку, одержане на первинному еталоні;

V_n – діюче значення вхідної (збуджуючої) напруги на первинному еталоні.

$$P_{\epsilon} = G \cdot V_{\epsilon}^2, \quad (2.4)$$

де P_{ϵ} – значення вихідної потужності ультразвуку, одержане на вторинному еталоні;

V_{ϵ} – діюче значення вхідної напруги на вторинному еталоні,

або

$$P_{\epsilon} = P_n \frac{V_{\epsilon}^2}{V_n^2} \quad (2.5)$$

за умови достатньої стабільності УзВ (його електроакустичної провідності) у часі і що номінальні значення встановлених напруг під час калібрування на вторинному і на первинному еталоні однакові.

У режимі передавання значення ОПУз підлеглим ЗВ

Фізична модель

Кожний еталонний УзВ калібрують на еталоні, відповідно до Настанов з експлуатації ДШВК 407259.001 НЕ, на частоті його резонансу за встановленої напруги збуджуючого сигналу: не змінюючи положення органів управління еталона, УзВ встановлюють у вимірювачі потужності ультразвуку, як робочому засобі, і калібрують (повіряють) його відповідно до Настанов з експлуатації на даний прилад, і визначають відхилення показів вимірювача потужності від показів еталона.

Математична модель

$$\Delta(P) = P_p - P_{\epsilon}, \quad (2.6)$$

де $\Delta(P)$ – відхилення значення ультразвукової потужності P_p , одержане за результатами вимірювання на робочому засобі, від P_{ϵ} , визначеної на вторинному еталоні.

Усі величини, які входять у модельні функції (рівняння вимірювання) (2.1)-(2.5), а також інші неінформативні параметри та впливові величини, які не входять безпосередньо у модельну функцію, але є достовірною інформацією про їх суттєвий вплив на результат вимірювання потужності ультразвуку, подані у таблиці вхідних величин (таблиця 5.1)

Таблиця 3.1 – Перелік операцій експериментальних досліджень

Назва операції	Пункт МА	ЗВ, що застосовують	Приміт -ка
1 Зовнішній огляд апаратури еталона	4.1		
2 Випробовування апаратури еталона	4.2		
3 Визначення МХ еталона:	4.3		
3.1 Визначення метрологічних характеристик ультразвукового вимірювального блока	4.3.1	рівень, комплект важків, штангенциркуль, кутомір, вимірювальні шаблони, термометр для вимірювання температури води	
3.2 Визначення метрологічних характеристик ультразвукових випромінювачів	4.3.2	Е7-8, тераомметр, термометр для вимірювання температури води	
3.3 Визначення метрологічних характеристик вимірювального каналу еталона	4.3.3		

У обґрунтованих випадках з метою підвищення точності або продуктивності досліджень допускається змінювати порядок виконання вказаних вище операцій, об'єднувати деякі з них, коригувати форму таблиць, а також використовувати ЗВ інших типів з відповідними або вищими МХ.

3.4 Засоби атестації

Для проведення атестації та контролю умов довкілля застосовують ЗВ та допоміжне обладнання, що подані в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Перелік ЗВ, які використовують під час проведення атестації

Назва ЗВ	Основні технічні характеристики ЗВ		Рекомендований тип засобу
	Границі вимірювання	Характеристики похибок	
Комплект важків	від 10 мг до 1,0 г	$\Delta = \pm 0,22$ мг	
Гігрометр психрометричний	Відносна вологість 10 ... 90 %	$\Delta = \pm 3,5$ %	СОПОС-М
Барометр	630 ... 800 мм рт. ст.	$\Delta = \pm 0,4$ мм рт. ст.	
Термометр	10 ... 35 °С	$\Delta = \pm 0,5$ °С	
Термометр для вимірювання температури води	8 ... 38 °С	$\Delta = \pm 0,2$ °С	
Шумомір (віброметр)	15 ... 140 дБ	$\Delta = \pm 1$ дБ	Точний імпульсний шумомір типу 00 023 фірми RFT
Вимірювач С.L.R.	C: 0,01 пФ ... 100 мкФ tg δ : $1 \cdot 10^{-4}$... 1	$\delta = \pm [1 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0,5 \text{ tg } \delta) \cdot C_l + 0,01 \text{ пФ} + 1 \cdot 10^{-4} \cdot C_k]$, %	Е7-8
Тераомметр	10 ... 10^{14} Ом	$\delta = \pm 2,5$ % (від 10^6 до 10^8 Ом) $\delta = \pm 4,0$ % (від $3 \cdot 10^8$ до 10^{11} Ом) $\delta = \pm 6,0$ % (від $3 \cdot 10^{11}$ до 10^{12} Ом) $\delta = \pm 2,5$ % (на 10^{13} Ом)	Е6-13А
Штангенциркуль,	0 ... 250 мм	Ціна поділки 0,1 мм	ГОСТ 166-80
Рівень		$\Delta = 0,057^\circ \sim 1$ мм на 1 м	Рівень алюмінієвий
Вимірювальні шаблони	1 ... 10 мм	$\Delta = \pm 0,1$ мм	

4 МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Зовнішній огляд апаратури еталона

Під час зовнішнього огляду апаратури еталона необхідно перевірити:

- комплектність апаратури і експлуатаційної документації еталона, яка повинна відповідати розділу “Склад еталона” у паспорті на еталон ДШВК 407259.001 ПС;
- відсутність механічних пошкоджень апаратури та з'єднувальних кабелів;
- відповідність маркувань еталона і його складових частин вимогам технічної документації на них;
- чіткість фіксації рухомих частин органів управління;

ДП НДІ “Система”	Методика атестації ДШВК 407259.001 МА	27.10.2010 р. Стор. 11 з 29	157
---------------------	--	--------------------------------	-----

- відповідність структурним схемам з'єднань окремих складових частин еталона та приладів;
- наявність запобіжників, заземлення тощо.

4.2 Випробовування апаратури еталона

Всі стандартизовані прилади до початку атестації повинні пройти перевірку (калібрування) відповідно до вимог їх експлуатаційної документації.

Випробовування еталона проводять після включення та прогріву апаратури еталона та допоміжних ЗВ згідно з відповідними розділами інструкцій з експлуатації. Перевіряється функціонування окремих компонентів, приладів та еталона в цілому.

До операцій випробовування відносяться:

- перевірка дії органів управління, регулювання, настройки апаратури еталона та використовуваних ЗВ;
- визначення рівня напруги і частоти мережі живлення;
- перевірка функціонування вимірювальних каналів еталона подаванням на входи каналів тестових сигналів;
- перевірка роботи індикаторів, освітлювальних пристроїв, якості зображення тощо;
- перевірка функціонування ультразвукового вимірювального блоку за допомогою важків.

Результати експериментів за п.п. 4.1 та 4.2 вважаються позитивними і еталон підлягає подальшим експериментальним дослідженням, якщо комплектність еталона відповідає його паспорту і він функціонує відповідно до вимог п.п. 4.1 та 4.2 та експлуатаційної документації на еталон.

4.3 Визначення метрологічних характеристик еталона

4.3.1 Визначення метрологічних характеристик ультразвукового вимірювального блоку

Перед проведенням досліджень вимірювальний блок та іншу апаратуру еталона необхідно підготувати до вимірювання відповідно до пункту «Підготовка до роботи» Настанов з експлуатації ДШВК 407259.001 НЕ. Обчислити фактичну масу відповідних наборів еталонних важків та характеристики їх похибок; результати занести в таблицю А.1.

Визначення нелінійності ультразвукового вимірювального блоку

На шальку терезів помістити важок номінальною масою 10 мг. Терези включити на запис і протягом 60 с реєструвати вихідний сигнал, набравши приблизно 240 відліків. Вирахувати середнє арифметичне спостереження. Повторити три рази і вирахувати середнє та середнє квадратичне відхилення

результатів спостережень та різницю між середнім значенням показів терезів та фактичної маси важка (набору важків). Одержані дані занести в таблицю А.1.

При цьому:

- середнє арифметичне значення обчислювати за формулою:

$$\bar{m}_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{Ti}, \quad (4.1)$$

- середнє квадратичне відхилення результатів вимірювання $S_{\bar{x}}$:

$$S_{\bar{x}} = \frac{m_{T \max} - m_{T \min}}{d_n \sqrt{n}}, \quad (4.2)$$

де $m_{T \max}$; $m_{T \min}$ – максимальне та мінімальне значення маси, яку показують терези, відповідно;

n – число спостережень ($n = 3$);

d_n – коефіцієнт, залежний від числа спостережень n ($d_n = 1,693$).

Відхилення показу терезів від фактичної маси важка (набору важків) – відхилення від лінійності:

$$\Delta m = \bar{m}_T - m_o, \quad (4.3)$$

де m_o – фактична маса важка (набору важків).

Вимірювання повторити з важками масою 20; 30; 50; 100; 150; 300 мг як написано вище.

Всю процедуру виконати три рази і дані занести в таблицю А.1 додатку А.

За результатами вимірювання побудувати графік залежності $\bar{m}_T = f(m_o)$ і

$\Delta m = f(m_o)$.

4.3.2 Визначення метрологічних характеристик ультразвукових випромінювачів

Перед початком дослідження необхідно провести контроль електроакустичних характеристик кожного УзВ на відповідність технічній документації, вимірявши:

- електроакустичну ємність;
- тангенс кута діелектричних втрат;
- внутрішній опір чутливого елемента.

Для вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат під'єднати УзВ до вимірювача С.Л.Р (наприклад, Е7-8).

Виміряти внутрішній опір чутливого елемента з допомогою тераомметра типу Е6-13А.

Провести вимірювання та обчислити похибки.

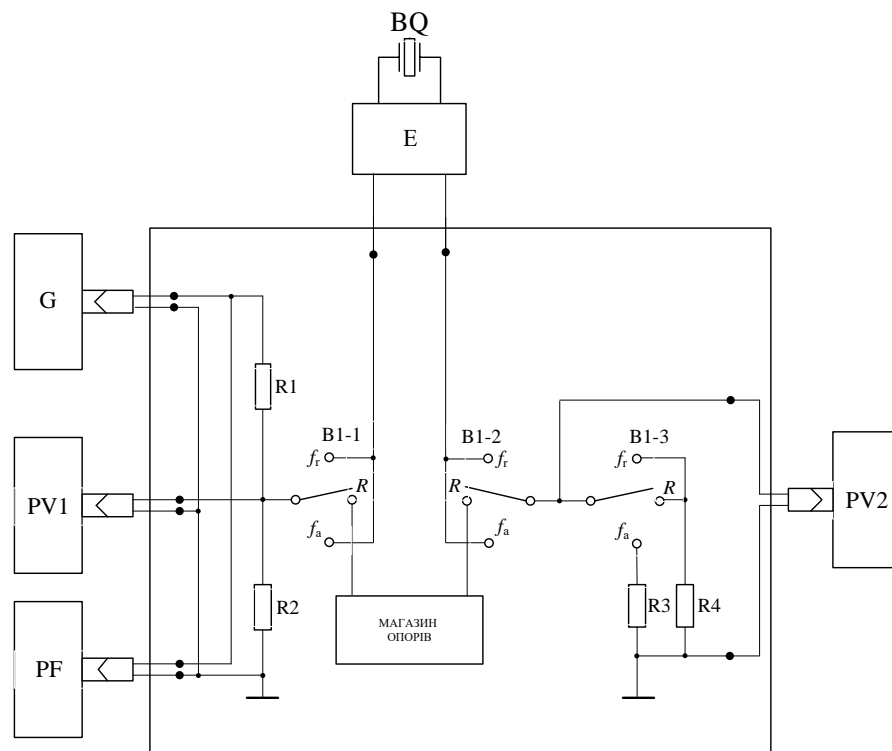
УзВ вважається придатним для подальшої експлуатації, якщо його електроакустичні характеристики відповідають поданим у технічній документації.

Визначення резонансної частоти

Для визначення резонансної частоти УзВ необхідно зібрати електричну схему відповідно до рисунку 4.1.

З генератора G на вхід ультразвукового випромінювача BQ подати сигнал такого рівня, щоб падіння напруги на опорі R1 складало 0,5В. Ця напруга контролюється протягом всього часу вимірювання мілівольтметром PV1. Перемикачі B1-1, B1-2 та B1-3 знаходяться у положенні « f_r ». Плавною зміною частоти генератора досягти максимального відхилення стрілки мілівольтметра PV2. Цей максимум відповідає резонансній частоті f_r , яку виміряти частотоміром PF.

Провести не менше десяти спостережень. Обчислити середнє значення та СКВ результату вимірювання. Дані занести в таблицю А.2 додатку А.



BQ – УзВ;

G – генератор;

PF – частотомір;

PV1, PV2 – мілівольтметри;

R1, R2, R3, R4 – резистори (R1=24 Ом, R2=200 Ом, R3=2 Ом, R4=51 Ом);

B1-1, B1-2, B1-3 – перемикачі;

Е – тримач.

Рисунок 4.1 – Схема для вимірювання резонансної частоти УзВ

Визначення впливу зміщення резонансної частоти на точність вимірювання потужності ультразвуку

Підготувати до вимірювання апаратуру еталона згідно з пунктом «Підготовка до роботи» Настанов з експлуатації ДШВК 407259.001 НЕ.

З метою визначення складової похибки вимірювання потужності ультразвуку від зміщення резонансної частоти УзВ f_p необхідно спочатку виміряти потужність УзВ на його резонансній частоті f_p , а потім на частотах, які відхиляються від f_p у сторону збільшення і зменшення на: $\pm 0,5$; ± 1 ; ± 2 ; ± 4 ; $\pm 8\%$. Вимірювання провести три рази. Обчислити середнє арифметичне значення та середнє квадратичне відхилення результату вимірювання. Знайти функцію апроксимації $\Delta P = f(f_p)$ у районі резонансу з використанням персонального комп'ютера. Одержані результати занести в таблицю А.3 додатку А.

Визначення електроакустичної провідності УзВ

Для визначення електроакустичної провідності кожного УзВ необхідно підготувати до вимірювання апаратуру еталона, як указано у пункті «Підготовка до роботи» Настанов з експлуатації ДШВК 407259.001 НЕ. Провести вимірювання потужності ультразвуку P випромінюваного УзВ та рівень напруги на його вході V_{ex} , подаючи напругу збуджуючого сигналу $V_{pp}^{1)}$ на генераторі в діапазоні від $1 V_{pp}$ до $10 V_{pp}$ з кроком $3 V_{pp}$. Вимірювання повторити 10 разів. Результати зареєструвати на персональному комп'ютері та ілюструвати графіком, як показано на рисунку 4.2 за допомогою програмного комплексу Microsoft Excel. Обробити участок графіка $F = f(t)$ $\Delta t = t_4 - t_3 \approx 240$ (див. рис. 4.2) шляхом регресивного аналізу та знайти потужність на момент t_1 включення УзВ, екстраполюючи криву $F = f(t)$ до перетину з прямою $t = t_1$.

Обчислити електроакустичну провідність G УзВ за формулою

$$G = \frac{P}{V_6^2}. \quad (4.4)$$

Обчислити середнє арифметичне і середнє квадратичне відхилення випадкової похибки $S_{\bar{x}}$ за 10-ти незалежних спостережень із формули:

$$S_{\bar{x}}^2 = S_{\bar{x}_m}^2 + S_{\bar{x}_n}^2 + S_{\bar{x}_V}^2, \quad (4.5)$$

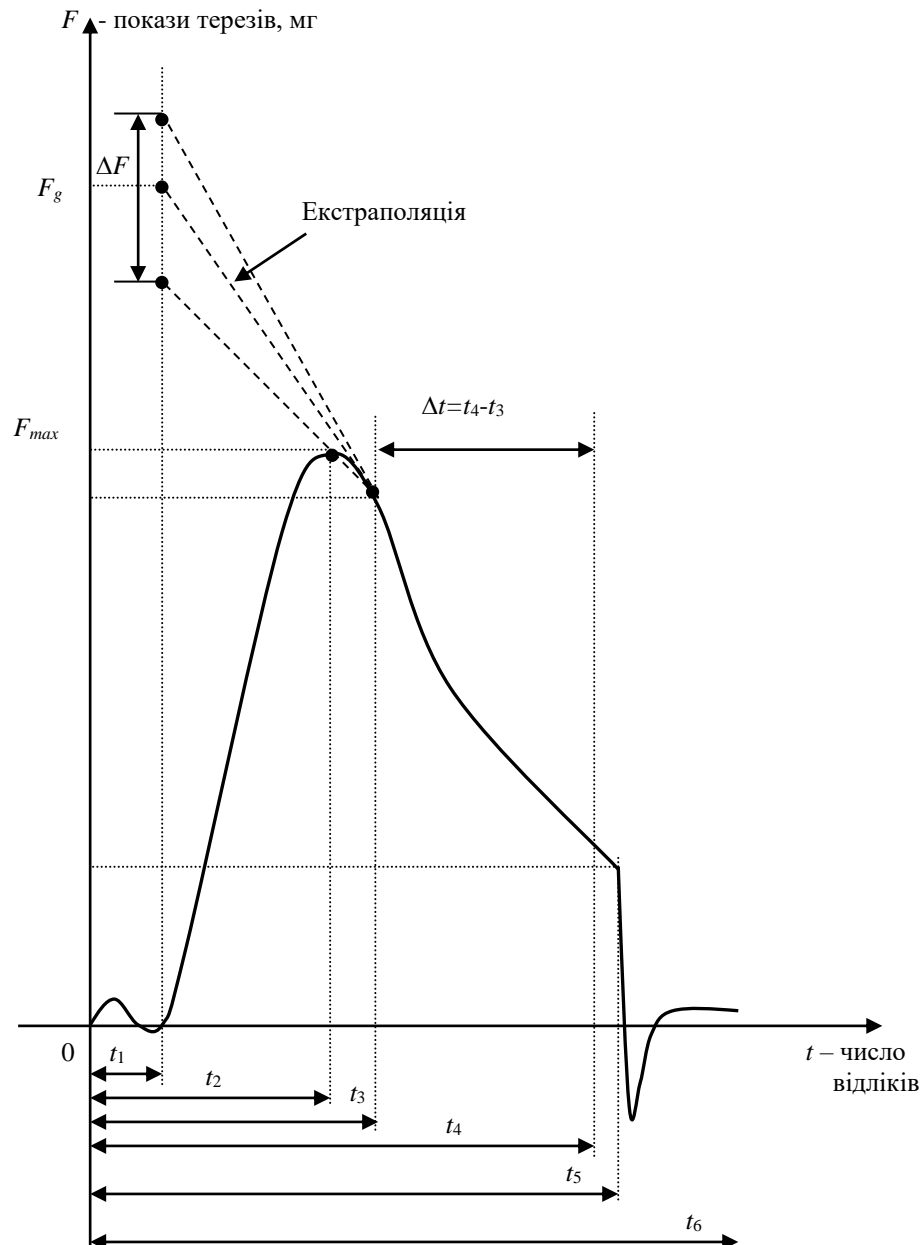
де $S_{\bar{x}_m}^2$ – дисперсія, яка пов'язана з впливом зовнішніх шумів і вібрацій;

$S_{\bar{x}_n}^2$ – дисперсія, що виникає за рахунок багаторазових n спостережень;

$S_{\bar{x}_V}^2$ – дисперсія за рахунок вимірювання при різних напругах збудження V_{pp} .

Дисперсія, яка пов'язана з впливом зовнішніх шумів і вібрацій, визначається за формулою:

¹⁾ Встановлена номінальна напруга (розмах синусоїдального сигналу) генератора на п'ятидесяти-омному навантаженні



F_g – дійсне значення у момент t_1 ;

F_{max} – дійсне значення (максимальне) у момент t_2 ;

$t = 0$ – момент включення запису;

t_1 – момент включення подачі сигналу на УзВ;

t_2 – досягання максимального значення;

t_3 – момент, у який, можна вважати, закінчився перехідний процес, пов'язаний з електричною частиною, терезами, інертністю УзВ та водного середовища (лишився тільки процес нагрівання п'єзокераміки);

t_4 – кінець реалізації;

t_5 – вимкнення подачі сигналу на УзВ;

t_6 – кінець запису.

Рисунок 4.2 – Метод екстраполяції результату вимірювання потужності назад до моменту увімкнення УзВ на основі регресійного аналізу

$$S_{xm}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2}{n(N-1)}, \quad (4.6)$$

де F_i і \bar{F} – покази терезів за i -того відліку (спостереження) та середнє значення реалізації відповідно;

N – число відліків впродовж реалізації Δt ;

$n = 10$ – нормоване число незалежних спостережень.

Одержані результати занести в таблицю А.4 додатку А.

Оцінювання стабільності УзВ

Для оцінювання довготривалої стабільності УзВ дослідити залежність електроакустичної провідності УзВ. Визначати електроакустичну провідність УзВ один раз на місяць протягом року згідно з методикою, викладеною вище, при фіксованому значенні вхідної напруги.

Отримані результати занести в таблицю А.5 додатку А.

4.3.3 Визначення метрологічних характеристик вимірювального каналу еталона

Для визначення МХ вимірювального каналу еталона необхідно провести його підготовку до вимірювання відповідно до пункту «Підготовка до роботи» Настанов з експлуатації (ДШВК 407259.001 НЕ) та провести вимірювання потужності ультразвуку за 10-ти спостережень, як описано в підрозділі 4.3.2. Шляхом екстраполяції знайти потужність у момент включення ультразвукового випромінювача, яку розглядають як кінцевий результат вимірювання. Знайти середнє арифметичне значення і СКВ результату вимірювання потужності для кожного УзВ на ряді напруг V_{pp} у діапазоні від 1 В до 10 В з кроком 2 В. Дані занести в таблицю А.6 додатку А.

5 ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оцінювання метрологічних характеристик провести відповідно до вимог МИ 2083 [7] з врахуванням ДСТУ ГОСТ 8.381 [5].

Оцінювання невизначеності у вимірюванні на вторинному еталоні проводити відповідно до GUM [11] з врахуванням ДСТУ Н-РМГ 43 [10].

Оцінювання характеристик точності еталона у режимі відтворення ОПУз

СКВ випадкової похибки $S_{\bar{x}_p}$ за 10-ти незалежних спостережень визначається як середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного:

$$S_{\bar{x}_P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.7)$$

де n – число незалежних спостережень ($n = 10$);

P_i, \bar{P} – результат i -го спостереження та середнє значення вимірюваної потужності, відповідно.

Границі невиключеної систематичної похибки еталона відповідно до [3, 7] за довірчої імовірності 0,99 обчислюється за формулою:

$$\Theta = \pm 1,4 \sqrt{\sum_{i=1}^K \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Theta_i^2 + \sum_{j=1}^L \Theta_j^2}, \quad (4.8)$$

де f – модельна функція (2.1)-(2.2);

x_i – i -та вхідна величина;

Θ_i – границі НСП i -ої вхідної величини, яка входить у модельну функцію f ;

Θ_j – границі НСП j -ої вхідної величини, яка не входить у модельну функцію;

K, L – число вхідних величин, які, відповідно, входять і які не входять у модельну функції (див. таблицю 5.1 вхідних величин).

Таблиця 5.1 – Вхідні величини

№ з/п	Вхідна величина	Позна-чення	Одиниці вимірю-вання	Номінальне значення	Характеристики точності (відхилення), %
1	Швидкість звуку у воді	c	м/с	1493,5	$7 \cdot 10^{-2}$
2	Радіаційна сила	F	мГ	3,4÷68,3	0,6÷12
3	Частота резонансу	f_p	МГц	0,5÷20	2,5
4	Частота збуджуючого сигналу	f	МГц	0,5÷20	$1 \cdot 10^{-4}$
5	Температура води (змiна на $\pm 1^\circ\text{C}$)	t	$^\circ\text{C}$	21,5	0,2
6	Прискорення земного тяжіння	g	м/с ²	9,811	$1 \cdot 10^{-3}$
7	Метод екстраполяції до моменту увiмкнення	E	-	-	2,0
8	Напруга на вході УзВ	$V_{\text{вх}}$	В	0,5÷10	4,5÷8

Або

$$\Theta = \pm 1,4 \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial f}\right)^2 \cdot \Theta_f^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial p}\right)^2 \cdot \Theta_{f_p}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 \cdot \Theta_c^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial g}\right)^2 \cdot \Theta_g^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial F}\right)^2 \cdot \Theta_F^2 + \Theta_I^2 + \Theta_E^2}, \quad (4.9)$$

де індекси при Θ відповідають позначенням вхідних величин у таблиці 5.1.

Для обчислення розширеної невизначеність скласти бюджет невизначеності за наступним алгоритмом:

1. Визначити номінальні значення та характеристики точності вхідних величин x_k (див. таблицю 2.1).

2. Обчислити коефіцієнти чутливості c_k , як частинні похідні модельної функції f :

$$c_k = \frac{\partial f}{\partial x_k}.$$

3. Прийняти відповідний закон розподілу вхідних величин та обчислити стандартні невизначеності вхідних величин $u(x_k)$.

4. Модельна функція побудована так, що всі джерела невизначеності можуть бути прийняті некорельованими (коефіцієнт кореляції $r = 0$).

5. Обчислити внесок $u_k(y)$ кожної вхідної величини у сумарну стандартну невизначеність:

$$u_k(y) = c_k \cdot u(x_k), \quad (4.10)$$

де $u(x_k)$ – стандартна невизначеність k -ої вхідної величини;

c_k – коефіцієнт чутливості k -ої вхідної величини.

6. Сумарну стандартну невизначеність u_c обчислити за формулою:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2, \quad (4.11)$$

де u_A – стандартна невизначеність, яку розраховують за типом А;

u_B – стандартна невизначеність, яку розраховують за типом В.

$$u_B^2 = \sum_k u_k^2(y), \quad (4.12)$$

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

$$u_A = S_{\bar{x}}, \quad (4.13)$$

де $S_{\bar{x}}$ – СКВ результату вимірювання при збереженні і передаванні одиниці потужності.

7. Обчислити розширену невизначеність U (при коефіцієнті розширення $k = 2$, що відповідає рівню довірчої імовірності 0,95):

$$U = k \cdot u_c, \quad (4.14)$$

8. Обчислити частки внесків:

$$\zeta = \frac{u_k^2(y)}{u_c^2}, \quad (4.15)$$

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

9. Результати розрахунків звести у загальну таблицю бюджету невизначеності, форма якої подана в додатку А (таблиця А.7).

Оцінювання характеристик точності еталона у режимі зберігання ОПУз

СКВ випадкової похибки за 10-ти незалежних спостережень під час зберігання ОПУз, одержаної від перинного (зарубіжного) еталона визначають за формулою:

$$S_{BT} = \sqrt{S_{Pn}^2 + S_{Vn}^2 + 2(S_{P\epsilon}^2 + S_{V\epsilon}^2)}, \quad (4.16)$$

де S_{Pn} , $S_{P\epsilon}$ – СКВ випадкової похибки вимірювання потужності P_i і напруги збудження V_i під час калібрування на первинному і вторинному еталоні, відповідно;

S_{Vn} , $S_{V\epsilon}$ – СКВ випадкової похибки вимірювання напруги збудження V_i під час калібрування на первинному і вторинному еталоні, відповідно:

$$S_P^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - \bar{P})^2}{n(n-1)}; \quad (4.17)$$

$$S_V^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(V_i - \bar{V})^2}{n(n-1)}. \quad (4.18)$$

НСП еталона Θ

$$\Theta = \pm 1,4 \sqrt{\Theta_{Pn}^2 + 2(\Theta_{Vn}^2 + \Theta_{V\epsilon}^2)}, \quad (4.19)$$

де Θ_n – НСП вимірювання потужності на первинному еталоні;

Θ_{Vn} , $\Theta_{V\epsilon}$ – НСП вимірювання збуджуючої напруги на первинному і на вторинному еталоні, відповідно.

Довірчі границі похибки обчислюють згідно з додатком 2 ДСТУ ГОСТ 8.381 [5].

Розширену невизначеність обчислюють за алгоритмом поданим вище.

Результати оцінювання характеристик точності у двох загаданих вище режимах еталона за формулами (4.7-4.9), (4.16-4.19) та (4.14) занести у таблицю А.8 додатку А.

6 ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АТЕСТАЦІЇ

Результати атестації вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку оформити протоколами (див. додаток Б) і видати свідоцтво про атестацію відповідно до ДСТУ 3215 [1].

БІБЛІОГРАФІЯ

- 1 ДСТУ 3215-95 Метрологія. Метрологічна атестація засобів виміральної техніки. Організація та порядок проведення
- 2 ДСТУ 3231:2007 Метрологія. Еталони одиниць вимірювання державні, первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування
- 3 ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений
- 4 ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения
- 5 ДСТУ ГОСТ 8.381:2008 ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей
- 6 МИ 1317-86 ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроля их параметров
- 7 МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей
- 8 IEC 61161:2006 Second edition. Ultrasonics - Power measurement -Radiation force balances and performance requirements (IEC 61161:2006 Друге видання. Ультразвук - Вимірювання потужності – Зважування радіаційної сили та технічні характеристики)
- 9 ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення
- 10 ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений»
- 11 ISO/IEC GUIDE EXPRES:1995, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (Настанови з подання невизначеності у вимірюванні)
- 12 ГОСТ 12.2.007.0-75 ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности
- 13 ГОСТ 12.3.019-80 ССБТ. Испытания и измерения электротехнические. Общие требования безопасности
- 14 ГОСТ 12090-80 Частоты для акустических измерений. Предпочтительные ряды

ДП НДІ “Система”	Методика атестації ДШВК 407259.001 МА	27.10.2010 р. Стор. 21 з 29	167
---------------------	--	--------------------------------	-----

ДОДАТОК А

**ФОРМА ТАБЛИЦЬ НАБОРУ ДАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПІД ЧАС
АТЕСТАЦІЇ**

Таблиця А.1 – Результати калібрування ультразвукового вимірювального блока

Маса важків, m_0		Характеристики похибок	Покази терезів, m_T						Середнє, мг	СКВ середнього, %	Відхилення від фактичної	
номінальна, мг	фактична, мг		Номер спостереження								абсолютне	відносне
			1		2		3					
			Середнє, мг	СКВ, %	Середнє, мг	СКВ, %	Середнє, мг	СКВ, %				
10												
20												
30												
50												
100												
150												
200												
300												
Сере дне												
СКВ серед нього												

Таблиця А.2 – Результати вимірювання резонансної частоти частоти
ультразвукового випромінювача № _____.

Найменування параметра	Номер спостереження			Середнє, МГц	СКВ середнього, %
	1	...	10		
Резонансна частота, МГц					

Таблиця А.5 – Результати оцінювання стабільності ультразвукового випромінювача №_____.

Резонансна частота _____ МГц
Вхідна напруга _____ В

Дата проведення	Найменування параметра	Номер спостереження					$S_{\bar{x}_m}^2$	$S_{\bar{x}_n}^2$	$S_{\bar{x}_V}^2$	$S_{\bar{x}}$
		1	2	...	9	10				
	$V_{вх}$, В (середнє)			...						
	P , Вт (середнє)			...						
	G , См (середнє)			...						
	$G(t_1)$, См									

Таблиця А.6 – Результати визначення метрологічних характеристик вимірювального каналу еталона

Частота, f , МГц	Амплітуда генератора, В	Найменування параметра	Номер спостереження					Середнє	СКВ середнього, %
			1	2	...	9	10		
Ультразвуковий випромінювач №_____									
		P , Вт (середнє)			...				
		$P(t_1)$, Вт (у момент включення)			...				

Таблиця А.7 – Бюджет невизначеності

№ з/п	Вхідні величини					Вихідні величини	
	Позначення величини	Номінальне значення	Характеристики точності (відхилення), %	Коефіцієнти чутливості	Стандартна невизначеність, $u(x_k)$, %	Внесок, $u_k(y)$, %	Доля внеску, %
1	f	0,5÷20	$2 \cdot 10^{-5}$				
2	f_p						
3	c	1493,5	$7 \cdot 10^{-5}$				
4	ρ	0,9975	$1 \cdot 10^{-5}$				
5	g	9,811	$1 \cdot 10^{-4}$				
6	t	21,5	0,2				
7	F_ε						
8	V	var					
9							
10							
11	СКВ						
Сумарна стандартна невизначеність u_c , %							
Розширена невизначеність U , % ($k=2$)							

Таблиця А.8 – Результати оцінювання характеристик точності еталона.

Частота, МГц	Потужність, Вт	СКВ	НСП	Розширена невизначеність

ДП НДІ “Система”	Методика атестації ДШВК 407259.001 МА	27.10.2010 р. Стор. 26 з 29	172
---------------------	--	--------------------------------	-----

ДОДАТОК Б

**ФОРМА ПРОТОКОЛУ АТЕСТАЦІЇ
ВТОРИННОГО ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ
У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

ДП НДІ “Система”	Методика атестації ДШВК 407259.001 МА	27.10.2010 р. Стор. 27 з 29	173
---------------------	--	--------------------------------	-----

**ФОРМА ПРОТОКОЛУ АТЕСТАЦІЇ
ВТОРИННОГО ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ
У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

ПРОТОКОЛ № _____

атестації вторинного еталона
одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі
ВЕТУ _____

1 Об’єкт досліджень: вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку.

2 Дата проведення досліджень: з _____ по _____ 2010 року

3 Мета досліджень: визначення метрологічних характеристик вторинного еталона.

4 Параметри, що оцінюються: невиключена систематична похибка еталона; СКВ результату вимірювання потужності ультразвукового випромінювача за 10-ти незалежних спостережень; розширена невизначеність вимірювання на еталоні

5 Методи досліджень: відповідно до п.5 Методики атестації ДШВК 407259.001 МА.

6 Матеріально-технічне забезпечення: вторинний еталон ВЕТУ 10-169-01-11

7 Умови проведення досліджень:

- температура повітря, °С ;
- відносна вологість повітря, % ;
- атмосферний тиск, мм рт.ст ;
- напруга мережі живлення, В ;
- частота напруги мережі живлення, Гц

Місце проведення – лабораторія акустичних вимірювань ДП НДІ “Система”.

8 Результати досліджень:

8.1 Зовнішній огляд

Комплектність апаратури і експлуатаційних документів вторинного еталона відповідає (не відповідає) розділу “Склад еталона” у паспорті на еталон. Відсутні (присутні) механічні пошкодження апаратури еталона, з’єднувальних

ДП НДІ “Система”	Методика атестації ДШВК 407259.001 МА	27.10.2010 р. Стор. 28 з 29
---------------------	--	--------------------------------

кабелів. Маркування еталона і його складових частин відповідають (не відповідають) вимогам технічної документації на них.

8.2 Випробування еталона, що атестується, проводилося відповідно до Методики атестації.

8.3 Результати оброблення експериментальних даних атестації і обчислення значень метрологічних характеристик.

8.3.1 Результати визначення метрологічних характеристик ультразвукового вимірювального блоку

Визначення нелінійності ультразвукового вимірювального блоку проводилось відповідно до п. 4.3.1 Методики атестації.

В таблиці _____ та подані результати калібрування ультразвукового вимірювального блоку.

8.3.2 Результати визначення метрологічних характеристик ультразвукових випромінювачів

Визначення метрологічних характеристик ультразвукових випромінювачів проводилось відповідно до п. 4.3.2 Методики атестації.

Проведено контроль електроакустичних характеристик ультразвукового випромінювача № _____ і визначено, що його електроакустичні характеристики відповідають (не відповідають) поданим у технічній документації і УзВ є придатним (не придатним) для подальшої експлуатації.

В таблицях _____ подані результати визначення резонансної частоти ультразвукового випромінювача № _____ та впливу зміщення резонансної частоти на точність вимірювання потужності ультразвуку.

В таблицях _____ та на графіку на рисунках _____ подані результати визначення електроакустичної провідності ультразвукового випромінювача № _____.

8.3.3 Результати визначення метрологічних характеристик вимірювального каналу еталона

Визначення метрологічних характеристик вимірювального каналу еталона проводилось відповідно до п. 4.3.3 Методики атестації і подано в таблиці _____ та на графіку на рисунках _____.

8.3.4 Опрацювання результатів дослідження

Опрацювання результатів дослідження проводилось відповідно до п. 5 Методики атестації.

Бюджет невизначеності подано в таблицях _____.

СКВ випадкової похибки, границі НСП та розширена невизначеність на робочих частотах в діапазоні потужностей подано в таблиці _____.

За результатами досліджень визначено, що:

- СКВ випадкової похибки лежить в межах від _____ до _____ і відповідає (не відповідає) нормам, встановленим в технічній документації на еталон;

- границі НСП за довірчої імовірності 0,99 лежать в межах від _____ до _____ і відповідають (не відповідають) нормам, встановленим в технічній документації на еталон; та розширена невизначеність;

- розширена невизначеність при коефіцієнті розширення $k = 2$ лежить в межах від ____ до ____ відповідає (не відповідає) нормам, встановленим в технічній документації на еталон.

9 Висновки: вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі ВЕТУ _____ за результатами атестації визнаний таким, що відповідає (не відповідає) нормам, встановленим в технічній документації на еталон і придатний (не придатний) для застосування.

Робочий діапазон частот від ____ МГц до ____ МГц.

Діапазон відтворення ультразвукової потужності від ____ мВт до ____ Вт.

Границі основної невилученої систематичної похибки еталона при довірчій імовірності $P = 0,99$ лежать в межах від ____ % до ____ % (залежно від частоти і рівня потужності).

СКВ результату вимірювання – від ____ % до ____ % (залежно від частоти і рівня потужності).

Розширена невизначеність U (при коефіцієнті розширення $k=2$) – від ____ % до ____ % (залежно від частоти і рівня потужності).

Дослідження провели:

_____	_____	_____
посада	підпис	П.І.Б
_____	_____	_____
посада	підпис	П.І.Б
“ ____ ” _____ 20 ____ р.		

Додаток В

Розрахунок коефіцієнтів чутливості

Оскільки, для ультразвуку мала довжина хвилі є однією з основних характеристик, тоді, $k \gg 1$. Отже, $ka \gg 1$. Тоді для функції Бесселя 1-го порядку n можна використати асимптотичний розклад:

$$J_0(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{\pi}{4}\right), \quad J_1(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{3\pi}{4}\right)$$

і математична модель вимірювання потужності ультразвуку буде мати вигляд:

$$W = c \cdot m \cdot g \cdot \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}(ka)^3} \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi)}{1 - \frac{2}{\pi ka}} \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M);$$

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

$$\Pi_T = \alpha \cdot \Delta T;$$

$$\Pi_R = \begin{cases} \pm [\beta + \gamma(\delta f - \delta f_0)], & \text{якщо } \delta f > \delta f_0, \\ \pm \beta, & \text{якщо } \delta f \leq \delta f_0, \end{cases}$$

де W – потужність випромінюваного ультразвуку;

c – швидкість звуку у воді;

m – маса (покази терезів 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;

$\Pi_R, \Pi_T, \Pi_H, \Pi_M$ – поправки відповідно: на зміщення резонансної частоти, на відхилення температури від опорного значення, на недосконалість мішені та бачка, методична;

λ – довжина акустичної хвилі;

f – частота збуджуючого сигналу;

ΔT – відхилення температури від опорного значення;

δf – 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; $\alpha = \pm 0,2 \%$.

Запишемо частинні похідні:

$$\frac{\partial W}{\partial m} = c \cdot g \cdot \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}(ka)^3} \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi)}{1 - \frac{2}{\pi ka}} \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M),$$

$$\frac{\partial W}{\partial g} = c \cdot m \cdot \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}(ka)^3} \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi)}{1 - \frac{2}{\pi ka}} \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M),$$

$$\frac{\partial W}{\partial c} = m \cdot g \cdot \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}(ka)^3} \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi)}{1 - \frac{2}{\pi ka}} \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M),$$

$$\frac{\partial W}{\partial a} = c \cdot m \cdot g \cdot \frac{\left(\frac{3}{2ka} - \frac{1}{\pi(ka)^2}\right) \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi) + \left(2 - \frac{4}{\pi ka}\right) \sin(2ka - \frac{3}{4}\pi) - \frac{2}{\sqrt{\pi ka}}}{\sqrt{\pi ka^3} \left(1 - \frac{2}{\pi ka}\right)^2} \times$$

$$\times \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M),$$

$$\frac{\partial W}{\partial k} = c \cdot m \cdot g \cdot \frac{\left(\frac{3}{2ka} - \frac{1}{\pi(ka)^2}\right) \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi) + \left(2 - \frac{4}{\pi ka}\right) \sin(2ka - \frac{3}{4}\pi) - \frac{2}{\sqrt{\pi ka}}}{\sqrt{\pi k^3 a} \left(1 - \frac{2}{\pi ka}\right)^2} \times$$

$$\times \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M),$$

$$\frac{\partial W}{\partial f} = \frac{\sqrt{\frac{c}{2af}} \left(\left(\frac{3}{2f} - \frac{c}{2\pi^2 af^3} \right) \cos\left(\frac{4\pi af}{c} - \frac{3}{4}\pi\right) + \left(\frac{\pi a}{c} - \frac{1}{\pi f} \right) \sin\left(\frac{4\pi af}{c} - \frac{3}{4}\pi\right) - \frac{1}{f} \right)}{\pi^2 af \left(1 - \frac{c}{\pi^2 af}\right)^2} \times$$

$$\times c^2 \cdot m \cdot g \cdot \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M),$$

$$\frac{\partial W}{\partial V} = -2 \cdot c \cdot m \cdot g \cdot \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}(ka)^3} \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi)}{1 - \frac{2}{\pi ka}} \cdot \frac{V_0^2}{V^3} \cdot (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M)$$

Перейшовши до відносних величин, отримаємо коефіцієнти чутливості подані в таблиці А.1.

Таблиця А.1 - Коефіцієнти чутливості

Позначення величини	Коефіцієнти чутливості
m	1
g	1
c	1
a	$\frac{\left(\frac{3}{2ka} - \frac{1}{\pi(ka)^2}\right) \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi) + \left(2 - \frac{4}{\pi ka}\right) \sin(2ka - \frac{3}{4}\pi) - \frac{2}{\sqrt{\pi ka}}}{\sqrt{\pi ka} \left(1 - \frac{2}{\pi ka}\right) \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}(ka)^3} \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi)\right]}$
f	$c \cdot \frac{\sqrt{\frac{c}{2af}} \left(\left(\frac{3}{2f} - \frac{c}{2\pi^2 af^3}\right) \cos\left(\frac{4\pi af}{c} - \frac{3}{4}\pi\right) + \left(\frac{\pi a}{c} - \frac{1}{\pi f}\right) \sin\left(\frac{4\pi af}{c} - \frac{3}{4}\pi\right) \right) - \frac{1}{f}}{\pi^2 a \left(1 - \frac{c}{\pi^2 af}\right) \left[1 - \sqrt{\frac{c^3}{2\pi^4 a^3 f^3}} \cos\left(\frac{4\pi af}{c} - \frac{3}{4}\pi\right)\right]}$
k	$\frac{\left[\left(\frac{3}{2ka} - \frac{1}{\pi(ka)^2}\right) \cos(2ka - \frac{3}{4}\pi) + \left(2 - \frac{4}{\pi ka}\right) \sin(2ka - \frac{3}{4}\pi) - \frac{2}{\sqrt{\pi ka}} \right] \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi ka}\right)}{\sqrt{\pi k^3 a} \left(1 - \frac{2}{\pi ka}\right)^2 \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}(ka)^3} \cos\left(2ka - \frac{3}{4}\pi\right)\right]}$
V	- 2

ДОДАТОК Г

Програма для імітаційного моделювання процесу вимірювання на еталонній уставі одиниці потужності ультразвуку за методом Монте-Карло

Програма написана на мові Delphi 6.

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, TeEngine, Series, TeeProcs, Chart, DbChart, XPMan,
  ExtCtrls;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Panel1: TPanel;
    GroupBox1: TGroupBox;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    Edit6: TEdit;
    Edit7: TEdit;
    Edit8: TEdit;
    Edit9: TEdit;
    Edit10: TEdit;
    GroupBox2: TGroupBox;
    XPManifest1: TXPManifest;
    DBChart1: TDBChart;
    Series1: TBarSeries;
    Label8: TLabel;
    Edit11: TEdit;
    Button1: TButton;
    CheckBox1: TCheckBox;
    CheckBox2: TCheckBox;
    CheckBox3: TCheckBox;
```



```

uses Math;

{$R *.dfm}

procedure get_input_values; // процедура вводу даних

begin
  with Form1 do
  begin
    VA :=StrToFloat(Edit1 .Text );
    VA_uns :=StrToFloat(Edit6 .Text );
    VC :=StrToFloat(Edit2 .Text );
    Vc_uns :=StrToFloat(Edit7 .Text );
    VF :=StrToFloat(Edit3 .Text );
    Vf_uns :=StrToFloat(Edit8 .Text );
    VG :=StrToFloat(Edit4 .Text );
    Vg_uns :=StrToFloat(Edit9 .Text );
    FF :=StrToFloat(Edit5 .Text );
    FF_uns :=StrToFloat(Edit10 .Text );
    VV :=StrToFloat(Edit15 .Text );
    VV_uns :=StrToFloat(Edit16 .Text );
    Vt :=StrToFloat(Edit17 .Text );
    Vt_uns :=StrToFloat(Edit18 .Text );
    VE :=StrToFloat(Edit19 .Text );
    VE_uns :=StrToFloat(Edit20 .Text );
    VM :=StrToFloat(Edit21 .Text );
    VM_uns :=StrToFloat(Edit22 .Text );
    VVo :=StrToFloat(Edit23 .Text );
    try_numb :=StrToInt(Edit11.Text );
    step_bar :=StrToInt(Edit12.Text );
    A_law := CheckBox1 .Checked;
    C_law := CheckBox2 .Checked;
    F_law := CheckBox3 .Checked;
    G_law := CheckBox4 .Checked;
    FF_law := CheckBox5 .Checked;
    V_law := CheckBox6 .Checked;
    t_law := CheckBox7 .Checked;
    E_law := CheckBox8 .Checked;
    M_law := CheckBox9 .Checked;
  end;
end;

procedure get_one_randoms(one_law:Boolean ;One_val,One_uns:Double);
// генерація випадкових чисел
var i:Integer ;
begin
  Randomize ;
  if one_law
  then
  begin
    for i:=0 to try_numb -1 do one_in [i]:= RandG(One_val,2*One_uns);
  end;
end;

```

```

    end
  else
    begin
      for i:=0 to try_numb -1 do one_in [i]:= One_val+One_uns*(Random-0.5);
    end;
  end;
end;

procedure get_input_randoms;
// процедура запису згенерованого випадкового значення вхідним величинам
var i:Integer ;
begin
  get_one_randoms(A_law ,VA,VA_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do A_in[i]:= one_in [i];
  get_one_randoms(C_law ,VC,VC_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do C_in[i]:= one_in [i];
  get_one_randoms(F_law ,VF,VF_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do F_in[i]:= one_in [i];
  get_one_randoms(G_law ,VG,VG_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do G_in[i]:= one_in [i];
  get_one_randoms(FF_law ,FF,FF_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do FF_in[i]:= one_in [i];
  get_one_randoms(V_law ,VV,VV_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do V_in[i]:= one_in [i];
  get_one_randoms(t_law ,Vt,Vt_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do t_in[i]:= one_in [i];
  get_one_randoms(E_law ,VE,VE_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do E_in[i]:= one_in [i];
  get_one_randoms(M_law ,VM,VM_uns );
  for i:=0 to try_numb -1 do M_in[i]:= one_in [i];
end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
// процедура розрахунку значення вихідної величини – потужності ультразвуку
const border=5;
var i,n:Integer ;
    width_bar:Double ;
    n_str:String ;
begin
  DBChart1 .Series [0].Clear ;
  get_input_values;
  get_input_randoms;
  P_avg :=0;
  for i:=0 to try_numb -1 do
    begin
      k:=2*PI*f_in[i]*1e6/c_in[i];
      P_result [i]:=c_in[i]*ff_in[i]*g_in[i]/(1-2/(PI*k*a_in[i]));
      P_result [i]:=P_result [i]*(1-cos(2*k*a_in[i]-0.75*PI)/(k*a_in[i]*sqrt(pi*k*a_in[i])));
      P_result [i]:=P_result [i]*sqr(VVo/V_in[i])*(1+t_in[i]+E_in[i]+M_in[i]);
      P_avg :=P_avg + P_result [i];
    end;
  end;

// обчислення середнього, СКВ, коеф. асиметрії, ексцесу, невизначеності

```

```

P_avg :=P_avg /try_numb ;
P_std :=0;
P_asim :=0;
P_ex :=0;
for i:=0 to try_numb -1 do
begin
P_std :=P_std +sqr(P_avg -P_result[i]);
P_asim := P_asim + sqr(P_avg -P_result[i])*(P_avg -P_result[i]);
P_ex :=P_ex+ sqr(P_avg -P_result[i])*sqr(P_avg -P_result[i]);
end;
P_std :=sqrt(P_std /try_numb);
P_asim:=P_asim/try_numb/(sqr(P_std)*P_std);
P_ex :=P_ex/try_numb/(sqr(P_std)*sqr(P_std))-3;

for i:=0 to 255 do dens_in_bar [i]:=0;
width_bar :=border * P_std/step_bar ;
for i:=0 to try_numb -1 do
begin
n:=step_bar +round((p_result[i]-P_avg )/width_bar);
inc(dens_in_bar[n]);
end;
for i:=0 to 2*step_bar do
begin
if round(i*border /step_bar)-i*border /step_bar=0 then n_str :=IntToStr((round(i*border
/step_bar))-border )
else n_str :=";
DBChart1 .Series [0].AddXY(i,dens_in_bar[i]/try_numb,n_str );
end;
Edit13.Text :=FloatToStr(round(P_avg*1000)/1000 ) ;
Edit14.Text :=FloatToStr(round(P_std*1000)/1000 ) ;
Edit24.Text :=FloatToStr(round(P_asim*1000)/1000 ) ;
Edit25.Text :=FloatToStr(round(P_ex*1000)/1000 ) ;
end;

end.

```

Додаток Д

**Свідоцтва метрологічної атестації еталона одиниці потужності
ультразвуку у водному середовищі за 2010 рік та 2011 рік**



ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ТЕХНІЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ТА СПОЖИВЧОЇ ПОЛІТИКИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО “НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
МЕТРОЛОГІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ І УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ”
(ДП НДІ “СИСТЕМА”)

79008 м. Львів, вул. Кривоноса, 6
№ ПК 013-2009 03.08.2009

С В І Д О Ц Т В О

про державну метрологічну атестацію

№ 340/МА – 10 від 16 грудня 2010 р.

вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку
у водному середовищі ВЕТУ 10...01...

Номер 001 Дата виготовлення 2010 р.

Виробник ДП НДІ “Система”

Належить ДП НДІ “Система”

Призначення передавання розміру одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі робочим еталонам, робочим засобам вимірювання

Результати метрологічних досліджень

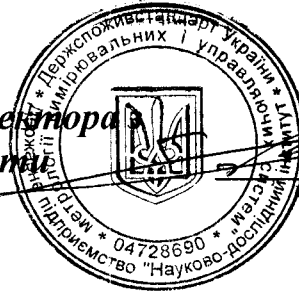
Назва метрологічної характеристики	Значення метрологічної характеристики	Назва, тип робочих еталонів, застосованих під час атестації
Діапазон частот:	від 0,5 до 20 МГц	відповідно до методики метрологічної атестації ДШВК 407259.001 МА
СКВ результату вимірювань S_B ОПУз за результатами 10-ти незалежних спостережень, %	від 0,2 % до 3 %	
НСП еталона передавання Θ_B за довірчої імовірності $P = 0,99$, %	від 2 % до 4 %	
Розширена невизначеність U з коефіцієнтом розширення $k=2$, %	від 2 % до 7 %	

За результатами державної метрологічної атестації (протокол метрологічних досліджень № Б 11-22-10 від 15.12.2010 р.) вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі визнаний таким, що відповідає вимогам паспорту вторинного еталона та придатний до застосування.

Атестацію проводити відповідно до методики метрологічної атестації
ДШВК 407259.001 МА

Наступну державну метрологічну атестацію провести
не пізніше 16 грудня 2011 р.

*Перший заступник директора
науково-технічної роботи*



підпис

В.В.Паракуда

*Науковий керівник теми,
головний науковий співробітник*

підпис

В.П.Чалий



ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ТЕХНІЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ТА СПОЖИВЧОЇ ПОЛІТИКИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО “НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
МЕТРОЛОГІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ І УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ”

(ДП НДІ “СИСТЕМА”)

79008 м. Львів, вул. Кривоноса, 6

№ ПК 013-2009 03.08.2009

С В І Д О Ц Т В О

про державну метрологічну атестацію

№ 388/МА – 11 від 27 грудня 2011 р.

вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку
у водному середовищі ВЕТУ 10-169-01-11

Номер 001 Дата виготовлення 2010 р.

Виробник ДП НДІ “Система”

Належить ДП НДІ “Система”

Призначення передавання розміру одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі робочим еталонам, робочим засобам вимірювання

Результати метрологічних досліджень

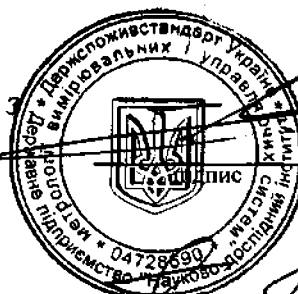
Назва метрологічної характеристики	Значення метрологічної характеристики	Назва, тип робочих еталонів, застосованих під час атестації
Діапазон потужностей:	від 0,005 Вт до 4 Вт	відповідно до методики метрологічної атестації ДШВК 407259.001 МА
Діапазон частот:	від 0,5 МГц до 20 МГц	
СКВ результату вимірювань S_B ОПУз за результатами 10-ти незалежних спостережень, %	від 0,2 % до 3 %	
НСП еталона передавання θ_B за довірчої імовірності $P = 0,99$, %	від 2 % до 4 %	
Розширена невизначеність U з коефіцієнтом розширення $k=2$, %	від 2 % до 7 %	

За результатами державної метрологічної атестації (протокол метрологічних досліджень № 388/МА-П від 27.12.2011 р.) вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі визнаний таким, що відповідає вимогам паспорту вторинного еталона та придатний до застосування.

Атестацію проводити відповідно до методики метрологічної атестації
ДШВК 407259.001 МА

Наступну державну метрологічну атестацію провести
не пізніше 27 грудня 2012 р.

*Перший заступник директора з
науково-технічної роботи*



В.В.Паракуда

Начальник НДВ-12

Підпис
підпис

Е.В. Пасько

Вчений зберігач ВЕТУ 10-169-01-11

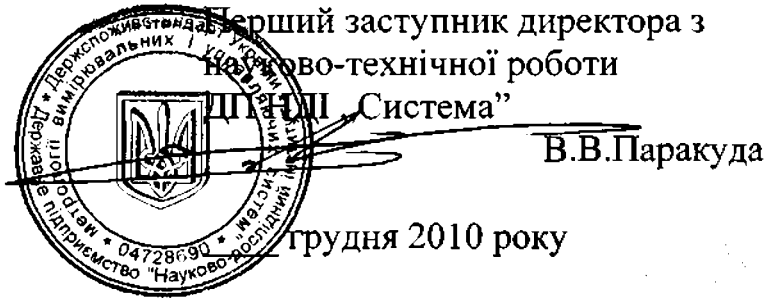
Підпис
підпис

Т.М. Ільницька

Додаток Е

**Висновок міжвідомчої комісії, акти випробувань, накази щодо еталона
одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі**

ЗАТВЕРДЖУЮ



АКТ

попередніх досліджень вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі

ДКР „Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі”,
шифр теми 06.17.22, № держреєстрації 0107U004930

Комісія у складі:

голова Чалий В.П., головний науковий співробітник, науковий керівник теми;

члени комісії: Пасько Е.В., начальника відділу ДП НДІ „Система”;

Ільницька Т.М., науковий співробітник;

Борис В.Й., провідного інженера;

Старухін Ю.М., провідний інженер-конструктор,

що працювала на підставі розпорядження по НДВ-12 від 30 серпня 2010 року у період з 11.09.2010 по 15.12.2010 року, провела попередні випробування вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.

Випробування проведені в акустичній лабораторії НДЛ-121 ДП НДІ „Система” за методикою атестації вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі ДШВК 407259.001 МА, яку розроблено НДВ-12 ДП НДІ „Система” і затверджено т.в.о. директора ДП НДІ „Система” М.І.Басарабом.

1 Мета випробувань: встановлення відповідності комплектності, функціонування, метрологічних та технічних характеристик апаратури вторинного еталона вимогам технічного завдання та методики атестації ДШВК 407259.001 МА.

2 Результати випробувань викладені в Протоколі № Б 11-22-10 метрологічної атестації вторинного еталона.

За результатами досліджень встановлено, що:

- комплектність експлуатаційних документів і апаратури вторинного еталона та її функціонування відповідають встановленим вимогам;

- робочий діапазон частот – від 0,5 МГц до 20 МГц;

- діапазон відтворення ультразвукової потужності – від 0,005 Вт до 1,55 Вт;

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

- СКВ результату вимірювання за 10-ти незалежних спостережень – від 0,2 % до 3,1 % (залежно від частоти і рівня потужності);

- розширена невизначеність U (при коефіцієнті розширення $k=2$) – від 2 % до 7 % (залежно від частоти і рівня потужності): $u_A = (0,2 - 3,1) \%$; $u_B = (0,83 - 1,65) \%$; $u_C = (0,85 - 3,42) \%$.

3 Висновки комісії:

Вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі відповідає вимогам технічного завдання, методики атестації і придатний для проведення випробувань міжвідомчою комісією.

Голова комісії



Чалий В.П.

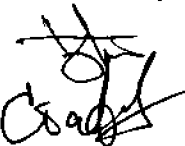
Члени комісії:



Пасько Е.В.



Ільницька Т.М.



Борис В.Й.



Старухін Ю.М.

ВИСНОВОК
комісії про можливість затвердження
еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі,
як вторинного

Комісія, що затверджена наказом ДП НДІ «Система» № 220 від 18 жовтня 2010 року, у складі:

Стадник Богдан Іванович – голова Комісії, директор Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., професор, заслужений винахідник України, лауреат Державної премії СРСР в галузі науки і техніки, м. Львів;

Шевченко Олександр Іванович – заступник голови Комісії, начальник відділу науково-дослідних робіт у сфері метрології Департаменту стандартизації та метрології Держспоживстандарту України, к.т.н., с.н.с., м. Київ;

Члени комісії:

Кричевець Олександр Михайлович – начальник науково-дослідного відділу, к.т.н., с.н.с.;

Народницький Геннадій Юрійович – начальник науково-дослідної лабораторії Національного наукового центру «Інститут метрології», к.ф.-м.н., с.н.с., м. Харків;

Рудий Степан Володимирович – начальник відділу ДП «Львівстандарт-метрологія», м. Львів;

Чалий Володимир Петрович – головний науковий співробітник ДП НДІ «Система», к.т.н., с.н.с.

на базі ДП НДІ «Система» в період з 23 по 24 грудня 2010 року ознайомилась з еталоном одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі, результатами його досліджень, умовами зберігання і застосування та матеріалами для реєстрації еталона.

Комісії було подано:

- еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі;
- технічна та конструкторська документація до еталона;
- технічне завдання на розроблення еталона та зміни до нього;
- доповідь ДП НДІ «Система»;
- паспорт еталона;
- правила зберігання та застосування еталона;
- методика атестації еталона;
- результати досліджень еталона;
- відомості про еталон для внесення його до Реєстру;

- рекомендація про призначення вченого зберігача еталона;
- проект ДСТУ-Н на локальну повірочну схему;
- проект наказу ДП НДІ «Система» про затвердження еталона, як вторинного.

У результаті проведення експериментальних досліджень і розгляду матеріалів комісією встановлено:

1. Представлений комісії еталон має технічні і метрологічні характеристики, які відповідають технічному завданню.

2. Еталон складається з комплексу таких засобів вимірювальної техніки та обладнання:

- ультразвуковий вимірювальний блок, у складі: терези ХА 60 Redwag, бачок вимірювальний, мішені, кожух захисний;
- комплект еталонних ультразвукових випромінювачів;
- генератор AFG 3021B;
- підсилювач потужності ДШВК 411188.007;
- електронна вимірювальна апаратура, у складі: мілівольтметр цифровий В3-52/1, осцилограф GDS 840С;
- персональний комп'ютер з програмним забезпеченням.
- система водопідготовки.
- комплект допоміжної контрольно-вимірювальної апаратури, у складі: барометр типу МД, гігрометр психометричний ВІТ-2 з термометром, термометр для вимірювання температури води, комплект різноважок типу F1 (1-500 мг);
- стіл еталона із системою амортизації;
- запасні деталі, інструменти, приналежності;

3 Діапазон значень частот та потужностей ультразвуку, у яких зберігається та передається одиниця вимірювання, становить відповідно 0,5 МГц до 20 МГц та від 0,005 Вт до 1 Вт.

Еталон забезпечує зберігання та передавання одиниці вимірювання із середнім квадратичним відхиленням сумарної похибки результату вимірювання під час звірення із зарубіжним первинним еталоном від 3 % до 7 % (залежно від частоти і рівня потужності).

Розширена невизначеність (коефіцієнт розширення $k=2$) U від 3,4 % до 16,1 % (залежно від частоти і рівня потужності), у тому числі $u_A = (0,2 - 3,1) %$; $u_B = (1,68 - 7,4) %$; $u_C = (1,7 - 8,05) %$.

4 Вся апаратура досліджена і знаходиться у робочому стані.

5 Умови зберігання і застосування еталона відповідають вимогам, установленим правилами.

6 Науково-технічний рівень еталона відповідає сучасним досягненням розвитку національної і світової науки і техніки.

7 За своїми метрологічними і технічними характеристиками еталон знаходиться на рівні зарубіжних аналогів.

8 Точність вимірювання одиниці потужності ультразвуку, що зберігає еталон, і точність передачі її розміру (відповідно до локальної повірочної

схеми) за допомогою робочих еталонів робочим засобам виміральної техніки, які застосовують в країні, відповідають сучасним вимогам.

9 Матеріали еталона підготовлені до розгляду НТР ДП НДІ «Система» - головною організацією Держспоживстандарту України з вимірювання акустичних величин.

Враховуючи викладене вище, комісія рекомендує ДП НДІ «Система»:

- затвердити еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі, як вторинний;
- внести зазначений вторинний еталон до Реєстру державних, первинних та вторинних еталонів одиниць вимірювання;
- підтримати пропозицію ДП НДІ «Система» щодо призначення наукового співробітника ДП НДІ «Система» Ільницьку Тетяну Мар'янівну вченим зберігачем вторинного еталона;
- відповідно до зауважень комісії доопрацювати локальну повірочну схему та заключний науково-технічний звіт.

Голова комісії

Б.І. Стадник

Заступник голови комісії

О.І. Шевченко

Члени комісії

О.М. Кричевець

Г.Ю. Народницький

С.В. Рудий

В.П. Чалий



ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
МЕТРОЛОГІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ І УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ»
(ДП НДІ «СИСТЕМА»)

НАКАЗ

24. 12. 2010

Львів

№ 281

Про затвердження вторинного
еталона одиниці потужності
ультразвуку у водному середовищі

З метою реалізації положень Закону України “Про метрологію та метрологічну діяльність” на підставі Рішення науково-технічної ради ДП НДІ “Система” № 3-1/2010 від 24.12.2010 р. та Висновку комісії про можливість затвердження еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі як вторинного,

НАКАЗУЮ

- 1 Затвердити вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі у складі, зазначеному у паспорті еталона.
- 2 Місцем зберігання вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі встановити НДВ-12 ДП НДІ “Система”, м. Львів.
- 3 Вченим зберігачем вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі затвердити Ільницьку Тетяну Мар’янівну, наукового співробітника НДВ-12 ДП НДІ “Система” (м. Львів).
- 4 Контроль за виконанням наказу залишаю за собою.

Т.в.о. директора

М.І. Басараб



н. Гасьму Е.В. Савор 2.0
н. Чалому В.П.

196

До виконання

07.02.11р

ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ
Національний науковий центр «Інститут метрології»
(ННЦ «Інститут метрології»)

вул.Мироносицька, 42 м.Харків, 61002
Тел: (057)700-34-09, факс 700-34-47
e-mail: info@metrology.kharkov.ua
Web: <http://www.metrology.kharkov.ua>

р/р 26002143260011 в ПУБЛІЧНОМУ АТ «АКБ «БАЗИС»
МФО 351760, код ЄДРПОУ 02568325

31.01.2011 № 140/02 - 393

На № 15/101 від 17.01.2011

Щодо реєстрації
вторинного еталона

Першому заступнику
директора
ДП НДІ «Система»
Паракуді В.В.

Вул. Кривоноса, 6
м. Львів, 79008

Шановний Василю Васильовичу!

Відповідно до ДСТУ 3231:2007 та наказу Держспоживстандарту України від 28 грудня 2010 р. №600 ННЦ „Інститут метрології” зареєстровано „Вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі”.

Повідомляємо його реєстраційний номер в Реєстрі державних, первинних та вторинних еталонів: **ВЕТУ 10-169-01-11.**

Просимо внести цей реєстраційний номер в документацію на вторинний еталон.

З повагою
Т.в.о. заступника
генерального директора

В.П. Бондаренко

000121

Марков 752-17-02
28.01.2011

(ДП НДІ "Система")		
Вх.№	58	
№	02	2011р.
Осн. док.	1	арк.
Додаток	-	арк.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Т.в.о. директора
ДКР „ІНД-Система”

М.І. Басараб

2010 року

АКТ

впровадження результатів робіт за темою 06.17.22
ДКР „Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у
водному середовищі”

За результатами проведених робіт створено і досліджено комплект апаратури вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку (ОПУз) у водному середовищі, розроблено комплект технічних та експлуатаційних документів на вторинний еталон та локальну повірочну схему для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі та досягнуто таких показників.

1 Створений вторинний еталон: відтворює ультразвукову потужність у діапазоні від 0,005 Вт до 1 Вт у робочому діапазоні частот від 0,5 МГц до 20 МГц.

Границі основної невилученої систематичної похибки еталона за довірчої імовірності $P = 0,99$ лежать у межах від 2 % до 4 % (залежно від частоти і рівня потужності).

СКВ результату вимірювання за 10-ти незалежних спостережень – від 0,2 % до 3 % (залежно від частоти і рівня потужності).

Розширена невизначеність U (при коефіцієнті розширення $k=2$) – від 2 % до 7 % (залежно від частоти і рівня потужності), при цьому:

- стандартна невизначеність за типом А – $u_A = (0,2 - 3,1) \%$;
- стандартна невизначеність за типом В – $u_B = (0,83 - 1,65) \%$;
- сумарна стандартна невизначеність – $u_C = (0,85 - 3,42) \%$.

2 Вторинний еталон ОПУз зберігає і передає її розмір (відповідно до локальної повірочної схеми) за допомогою робочих еталонів робочим засобам вимірювання, які застосовують в країні, відповідає сучасному світовому рівню та задовольняє потреби національної економіки.

З Таким чином результати роботи за темою 06.17.22 впроваджено під час створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі, який затверджено та введено в дію наказом ДП НДІ «Система» № 281 від 24.12.2010 р.

Перший заступник директора
з науково-технічної роботи,
канд.техн.наук, доцент



В.В. Паракуда

Начальник відділу,
канд.техн.наук., ст..наук.співроб.



Е.В. Пасько

Науковий керівник ДКР,
канд.техн.наук., ст..наук.співроб.



В.П. Чалий

Додаток Ж

**Локальна повірочна схема для засобів вимірювання потужності
ультразвуку у водному середовищі та наказ про її затвердження**

ЛОКАЛЬНА ПОВІРОЧНА СХЕМА УКРАЇНИ

Метрологія

**ЛОКАЛЬНА ПОВІРОЧНА СХЕМА
ДЛЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ
УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

ЛПУ 10-01-2011

Видання офіційне

**Київ
ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ
2011**

ПЕРЕДМОВА

- 1 РОЗРОБЛЕНО Державне підприємство “Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних та управляючих систем” (ДП НДІ “Система”)
- 2 РОЗРОБНИКИ: **Т. Ільницька, В. Чалий канд. техн. наук.** (керівник розробки)
- 3 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Держспоживстандарту України від 20 червня 2011 р. № 227
- 4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

**Право власності на цей документ належить державі.
Відтворювати, тиражувати і розповсюджувати цей документ повністю чи частково
на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу заборонено.
Стосовно врегулювання прав власності звертатись до Держспоживстандарту України**

Держспоживстандарт України, 2011

ЗМІСТ

	С.
1 Сфера застосування	1
2 Вторинний еталон	1
3 Робочі еталони	3
4 Робочі засоби вимірювання	3
Додаток А Локальна повірочна схема для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі	4

Метрологія
ЛОКАЛЬНА ПОВІРОЧНА СХЕМА
ДЛЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ
УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Чинний від _____

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Ця локальна повірочна схема України поширюється на засоби вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі (Додаток А) і встановлює призначення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку – ват (Вт) у водному середовищі; сукупність основних засобів вимірювання, що входять до його складу; основні метрологічні характеристики еталона і порядок передавання розміру одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі від вторинного еталона робочим еталонам та робочим засобам вимірювання із зазначенням похибок та основних методів повірки.

2 ВТОРИННИЙ ЕТАЛОН

2.1 Вторинний еталон призначено для зберігання одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі та передавання розміру одиниці за допомогою робочих еталонів робочим засобам вимірювання, які застосовують у національній економіці з метою забезпечення єдності акустичних вимірювань у країні.

2.2 В основу вимірювання одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі має бути покладена одиниця, одержана від опорного значення ключових звірянь СІРМ через участь у періодичних регіональних ключових звіреннях із зарубіжними первинними еталонами цієї одиниці.

2.3 Вторинний еталон складається з комплекту наступних засобів вимірювання:

- ультразвуковий вимірювальний блок;
- комплект еталонних ультразвукових випромінювачів;
- генератор;
- підсилювач потужності;
- мілівольтметр цифровий;
- осцилограф цифровий;
- персональний комп'ютер;
- комплект різноважків.

2.3 Діапазон значень потужності ультразвуку, у якому зберігається та передається одиниця вимірювання у водному середовищі, становить: від 0,005 Вт до 1 Вт.

2.4 Робочий діапазон частот становить: від 0,5 МГц до 20 МГц.

2.5 Границя основної невилученої систематичної похибки Θ_e еталона не більше ніж: від 2 % до 4 % за довірчої імовірності $P=0,99$ (залежно від частоти і рівня потужності).

2.6 Відносне середнє квадратичне відхилення результату вимірювання S_e при зберіганні одиниці потужності ультразвуку і звіренні із зарубіжними первинними еталонами від 0,2 % до 3 % за 10 незалежних спостережень (залежно від частоти і рівня потужності).

2.7 Розширена невизначеність U (коефіцієнт розширення $k=2$) у вимірюванні під час звірення із зарубіжними первинними еталонами – від 2 % до 7 %, залежно від частоти і рівня потужності:

стандартна невизначеність за типом А – $u_A = (0,2 - 3,1) \%$;

стандартна невизначеність за типом В – $u_B = (0,83 - 1,65) \%$;

сумарна стандартна невизначеність – $u_C = (0,85 - 3,42) \%$

2.8 Вторинний еталон одиниці потужності ультразвуку застосовують для повірки (калібрування) робочих еталонів методом опосередкованих вимірювань із допустимою відносною похибкою δ_g від 3 % до 5 %.

3 РОБОЧІ ЕТАЛОНИ

3.1 Як робочі еталони одиниці потужності ультразвуку у воді використовують:

- комплект еталонних низькочастотних (з п'єзокерамічними чутливими елементами) та високочастотних (з монокристалічними п'єзоелектричними чутливими елементами) випромінювачів в діапазоні потужностей – від 0,005 Вт до 1 Вт і в діапазоні частот – від 0,5 МГц до 20 МГц.

3.2 Відносна довірча похибка комплекту еталонних низькочастотних та високочастотних випромінювачів за довірчої імовірності 0,95 не перевищує δ_g від 5 % до 10 %.

3.3 Еталонні випромінювачі застосовують для повірки (калібрування) робочих засобів вимірювання методом прямих вимірювань із допустимою відносною похибкою δ_g – від 3 % до 5 %.

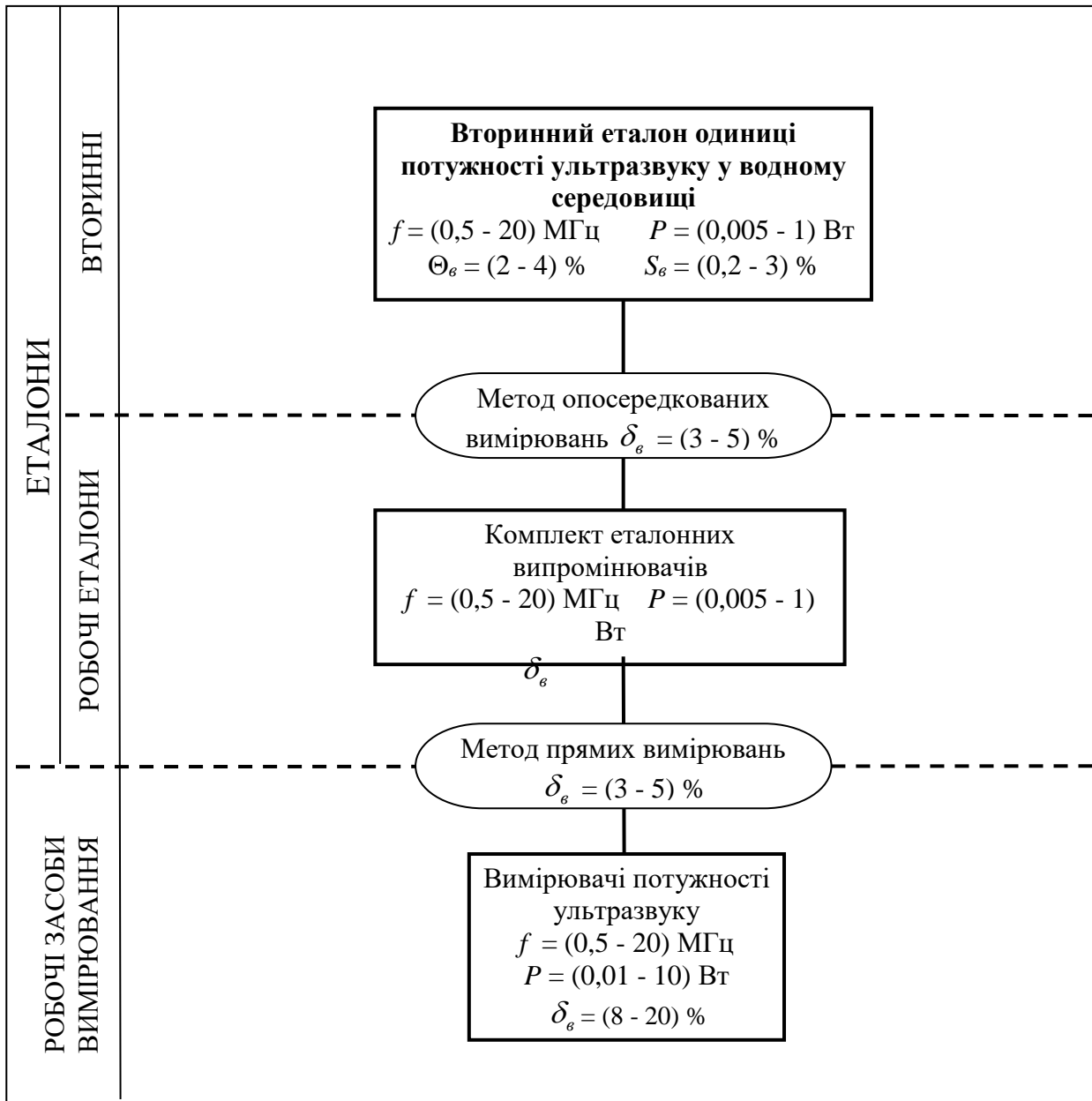
4 РОБОЧІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ

4.1 Як робочі засоби вимірювання використовують вимірювачі потужності ультразвуку у водному середовищі в діапазоні від 0,05 Вт до 10 Вт у частотному діапазоні від 0,5 МГц до 15 МГц.

4.2 Границі допустимої відносної похибки робочих засобів вимірювання потужності δ_g не повинні перевищувати значень – від 8 % до 20 % (залежно від частоти і рівня вимірюваної потужності).

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

**ЛОКАЛЬНА ПОВІРОЧНА СХЕМА ДЛЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ
ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**



УДК 534:321.9:534.6

Ключові слова: ват, випромінювач, еталон, засоби вимірювання, повірочна
схема, потужність ультразвуку, ультразвук



**ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ З ПИТАНЬ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА СПОЖИВЧОЇ ПОЛІТИКИ**

НАКАЗ

20 вересня 2011

Київ

№ 227

Про затвердження локальної
повірочної схеми для засобів
вимірювання потужності
ультразвуку у водному середовищі

З метою реалізації положень Закону України “Про метрологію та метрологічну діяльність”, на виконання Державної програми розвитку еталонної бази на 2006 – 2010 роки, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 01.03.2006 № 228, Державної програми розвитку еталонної бази на 2009 – 2010 роки, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 23.07.2008 № 676, вимог ДСТУ 3231:2007 “Еталони одиниць вимірювань державні, первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування” та враховуючи наказ ДП “НДІ “Система” від 24.12.2010 № 281 “Про затвердження вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі”,

НАКАЗУЮ:

1. Затвердити локальну повірочну схему України для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі ЛПУ 10-01-2011, очолювану вторинним еталоном одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі ВЕТУ 10-169-01-11.

2. ДП “НДІ “Система” (Басарабу М.І.) забезпечити публікацію локальної повірочної схеми ЛПУ 10-01-2011.

3. Контроль за виконанням цього наказу покласти на першого заступника Голови Ареф’єва В.В.

Голова комісії з реорганізації
Держспоживстандарту України


О.В. Пшеничка

Додаток 3

**Титульні аркуші методики повірки вимірювачів потужності
ультразвуку та методики калібрування ультразвукових випромінювачів**

ЗАТВЕРДЖУЮ

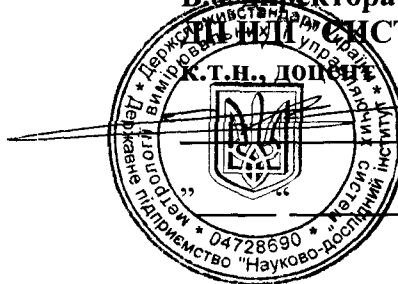
В.о. директора

"ДІАГНОСТИЧНА СИСТЕМА",

К.Т.Н., доцент

В.В. Паракуда

201__ р.



**ВТОРИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦІ ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ У
ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ВЕТУ 10-169-01-11.
МЕТОДИКА ПОВІРКИ ВИМІРЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ**

ДШВК 407259.001 МА2-АУ

Примірник №

РОЗРОБЛЕНО:

Головний науковий співробітник,
к.т.н., с.н.с.

 В.П. Чалий

" 14 " березня 2012 р.

Вчений зберігач еталона
ВЕТУ 10-169-01-11

 Т.М. Ільницька

" 14 " березня 2012 р.

Начальник НДВ-12, к.т.н., с.н.с.


 Е.В. Пасько

" 14 " березня 2012 р.