

Національний університет «Львівська політехніка»

Національний університет «Львівська політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШПАК Олександр Володимирович

УДК 534.621.5

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КАЛІБРУВАННЯ ГІДРОФОНІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

15 – «Автоматизація та приладобудування»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. В. Шпак

Науковий керівник Паракуда Василь Васильович, к.т.н., доцент

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Шпак О. В. Підвищення точності калібрування гідрофонів у водному середовищі. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 — Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. — Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі - підвищення точності калібрування гідрофонів, що використовуються для визначення параметрів акустичного виходу ультразвукового медичного обладнання під час процедур оцінки відповідності та калібрування.

З огляду на широкий спектр ультразвукових пристроїв як вітчизняного, так і іноземного виробництва, в Україні існує потреба у створенні систем для вимірювання параметрів акустичного виходу випромінювачів, а також еталонної бази для калібрування гідрофонів. Це забезпечить єдність і простежуваність ультразвукових вимірювань та їх міжнародне визнання. Запровадження у 2017 році національного державного первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі НДЕТУ AUV-02-2018 стало важливим кроком у цьому напрямі. Однак, для забезпечення простежуваності вимірювань до одиниць SI та міжнародного визнання еталона НДЕТУ AUV-02-2018 необхідно встановити його ступінь еквівалентності аналогічним еталонам інших країн через процедуру звірення. Для успішного проходження звірення невизначеність еталона НДЕТУ AUV-02-2018 має бути приведена у відповідність до рівня найкращих міжнародних зразків шляхом зменшення невизначеності вимірювань.

У роботі здійснено огляд типів гідрофонів та аналіз методів їх калібрування у водному середовищі. Подано схеми калібрування для кожного методу із зазначенням їх переваг і недоліків, а також проведено аналіз щодо точності, складності реалізації та застосовності у різних умовах експлуатації, враховуючи потреби та можливості економіки України.

Запропоновано реалізацію методу калібрування з детальним описом технічних характеристик та умов проведення вимірювань. Визначено основні складові невизначеності методу калібрування, згідно з якими сформовано бюджет невизначеності для оцінки розширеної невизначеності калібрування гідрофона на еталоні НДЕТУ-AUV-02-2018.

Запропоновано алгоритми дослідження ефективної площі та радіуса ультразвукових перетворювачів, які входять до складу еталона НДЕТУ-AUV-02-2018, отримано їх значення на робочих частотах та оцінено стандартну невизначеність цих параметрів. Проведено аналіз розрахунків коефіцієнтів дифракційних втрат двома методами з оцінкою меж похибки. Виміряно електричні параметри ультразвукових перетворювачів і підсилювача потужності для перевірки коректності використання коефіцієнта шунтування як поправки у математичній моделі передавальної характеристики гідрофона. Запропоновано удосконалену математичну модель передавальної характеристики гідрофона на основі методу взаємності із двома перетворювачами.

Представлено результати калібрування гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 (Україна) та у НМІ РТВ (Німеччина). Виконано порівняльний аналіз результатів калібрування для підтвердження коректності застосування удосконаленої математичної моделі передавальної характеристики гідрофона та їх узгодженості. На основі отриманих узгоджених результатів підтверджено вимірювальні і калібрувальні можливості еталона НДЕТУ AUV-02-2018.

Ключові слова: вимірювальний канал, гідрофон, еталон, імпеданс, калібрування, математична модель, метрологічні характеристики, невизначеність, перетворювач, похибка, ультразвук, частота.

ABSTRACT

Shpak O., Improving the accuracy of hydrophone calibration in the water environment. — Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy on the speciality 152 — Metrology and information-measuring technology. — Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025.

The thesis is devoted to solving an urgent scientific and technical task - improving the accuracy of calibration of hydrophones used to determine the parameters of acoustic output of ultrasonic medical equipment during conformity assessment and calibration procedures.

Based on the wide range of ultrasonic devices, both domestic and foreign, there is a need in Ukraine to create systems for measuring the acoustic output parameters of emitters, as well as a reference base for calibrating hydrophones. This will ensure the uniformity and traceability of ultrasonic measurements and their international recognition. The creation of the National State Primary Standard of Ultrasonic Pressure Unit in the Water Environment AUV-02-2018 in 2017 was an important step in this direction. However, in order to ensure the traceability of measurements to SI units and international recognition of the NDETU AUV-02-2018 standard, it is necessary to establish its degree of equivalence to similar standards of other countries through the comparison procedure. For successful comparison, the uncertainty of the NDETU AUV-02-2018 standard should be made in accordance with the level of the best international standards by reducing the measurement uncertainty.

The paper reviews the types of hydrophones and analyses the methods of their calibration in the aqueous environment. The calibration schemes for each method are presented, indicating their advantages and disadvantages, as well as an analysis of the accuracy, complexity of implementation and applicability in different operating conditions, taking into account the needs and capabilities of the Ukrainian economy.

The implementation of the calibration method is proposed with a detailed description of the technical characteristics and conditions of measurements. The main

sources of uncertainty of the calibration method are determined, according to which an uncertainty budget is formed to assess the extended uncertainty of the hydrophone calibration on the standard NDETU-AUV-02-2018.

The algorithms for studying the effective area and radius of ultrasonic transducers, which are part of the standard NDETU-AUV-02-2018, are proposed, their values at operating frequencies are obtained, and the standard uncertainty of these parameters is estimated. An analysis of the calculation of diffraction loss coefficients by two methods with an estimation of error limits is carried out. The electrical parameters of ultrasonic transducers and a power amplifier were measured to verify the correctness of using the shunt coefficient as a correction in the mathematical model of the hydrophone transmission response. An improved mathematical model of the hydrophone transmission response based on the method of reciprocity with two transducers is proposed.

The results of the hydrophone calibration on the standard of NDETU AUV-02-2018 (Ukraine) and in NMI PTB (Germany) are presented. A comparative analysis of the calibration results is performed to confirm the validity of the improved mathematical model of the hydrophone transmission response and their consistency. On the basis of the obtained consistent results, the measuring and calibration capabilities of the NDETU AUV-02-2018 standard were confirmed.

Keywords: calibration, error, frequency, hydrophone, impedance, mathematical model, measurement channel, metrological characteristics, standard, transducer, ultrasound, uncertainty.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Дувіряк Д., Шпак О., Паракуда В. Еталон одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі // *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2019. Том 80, вип. 3, С. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.058>

2. Duviriak D.; Shpak O.; Parakuda V., Kizlivskyi I. Experimental investigation on the effective radiating area of ultrasonic transducers with the aim of increasing the reproduction accuracy of the unit of ultrasonic pressure in water // *Ukrainian Metrological Journal*. 2022. Vol. 1, P. 44–50. (WoS Q4) DOI: [10.24027/2306-7039.1.2022.258819](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258819)

3. Shpak O., Duviriak D. Study of the effective radii of ultrasonic transducers // *Measuring Equipment and Metrology*. 2024. Vol. 85, No. 3, pp. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.03.010>

4. Шпак О., Дувіряк Д. Верифікація результатів калібрування голкових гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 // *Український метрологічний журнал*. 2024. вип. 3, С. 11–21. (WoS Q4) DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2024.312327>

5. Дувіряк Д.В., Шпак О.В. «Створення еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі» ст. 23; *Тези доповідей // XI міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка», 9-11 жовтня 2018 року, м. Харків;*

6. Паракуда В.В., Дувіряк Д.В., Шпак О.В., «Сучасний стан і розвиток еталонів акустичних величин в Україні», ст. 27; *Тези доповідей // XI міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка», 9-11 жовтня 2018 року, м. Харків;*

7. Шпак О.В., Паракуда В.В., «Забезпечення єдності та простежуваності вимірювань в Україні ультразвукового тиску у водному середовищі», ст. 95; *Тези доповідей // V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» 29 січня - 2 лютого 2019 року, смт. Славське;*

8. Шпак О.В., Кізлівський І.Г., «Єдність вимірювань потужності ультразвукового випромінювання в Україні», *ст. 93; Тези доповідей // V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» 29 січня - 2 лютого 2019 року, смт. Славське;*

9. Кізлівський І., Шпак О., Бубела І., «Оцінювання непевності у вимірюванні електроакустичної провідності на еталоні потужності ультразвуку», *ст. 120; Тези доповідей // Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019: XXIII Міжнародного семінару метрологів (МСМ'2019) до 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, 10–12 вересня 2019 року, – Львів, 2019;*

10. Вінниченко О.М., Шпак О.В., Кізлівський І.Г., Демчук Т.В., «Вплив швидкості розповсюдження звукової хвилі на непевність вимірювання ультразвукової потужності», *ст. 36-38., Тези доповідей; // VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2020», 4-7 лютого 2020 року, смт. Славське;*

11. Паракуда В., Кізлівський І., Шпак О., Копча М., Бубела І., «Впровадження національних стандартів для забезпечення якості вимірювання ультразвукових параметрів», *ст. 16-17 // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції, 20–21 травня 2021 року, м. Львів (ISBN 978-966-441-654-9, <http://science.lpnu.ua/qm-2021>);*

12. Oleksandr Shpak, Dariia Duviriak, Vasyl Parakuda «Effective radii of ultrasonic transducers for hydrophone calibration», *ст. 78, тези доповідей // II Міжнародна наукова-практична конференція: Інформаційно-вимірювальні технології IBT-2024, 13–14 листопада 2024 року, м. Львів (ISBN 978-966-941-972-9, <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/nov/36513/zbirniktezkonferenciivt2024nasait.pdf>).*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ГІДРОФОНІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	21
1.1 Гідрофони.....	21
1.1.1 Мембранні гідрофони (МН)	23
1.1.2 Капсульний гідрофон (СН).....	24
1.1.3 Голковий гідрофон (НН).....	24
1.1.4 Волоконно-оптичний гідрофон (ФОН)	25
1.2 Методи калібрування гідрофонів	26
1.2.1 Метод оптичної інтерферометрії	27
1.2.2 Метод планарного сканування.....	31
1.2.3 Метод взаємності.....	34
1.2.4 Метод порівняння з відкаліброваним опорним гідрофоном	38
1.3 Висновок до розділу.....	39
2 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ВЗАЄМНОСТІ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ ГІДРОФОНІВ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ДЖЕРЕЛ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	41
2.1 Реалізація методу взаємності з двома перетворювачами.....	41
2.2 Математична модель методу взаємності з двома перетворювачами.....	48
2.3 Аналіз джерел невизначеності еталона.....	50
2.4 Висновок до розділу.....	61
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	63
3.1 Дослідження ефективної площі допоміжного ультразвукового перетворювача	63
3.1.1 Визначення ефективної площі випромінювання A_{ER} УП	65

3.1.2 Аналіз джерел та розрахунок невизначеності вимірювання ефективної площі A_{ER}	70
3.2 Дослідження коефіцієнтів дифракційних втрат.....	74
3.3 Визначення ефективного радіуса допоміжного ультразвукового перетворювача та дослідження його впливу на вимірювальну відстань	84
3.3.1 Визначення ефективного радіуса ультразвукового перетворювача	85
3.3.2 Розрахунок невизначеності вимірювання ефективного радіуса УП....	89
3.3.3 Аналіз отриманих результатів дослідження.....	91
3.4 Дослідження коефіцієнта шунтування $K_R(f)$	99
3.5 Висновок до розділу.....	108
4 ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ЕТАЛОНІ НДЕТУ AUV-02-2018	110
4.1 Результати калібрування гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 .	110
4.2 Метод та результати калібрування гідрофонів у РТВ.....	113
4.3 Верифікація отриманих результатів калібрування.....	115
4.4 Висновок до розділу.....	119
ВИСНОВОК.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	122
ДОДАТОК А ТЕХНІЧНИЙ ПРОТОКОЛ ПІЛОТНИХ ЗВІРЕНЬ (ПРОЕКТ)	130
ДОДАТОК Б СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	140
ДОДАТОК В АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	145

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ

УП – ультразвуковий перетворювач
УМО – ультразвукове медичне обладнання
УЗТ – ультразвукова терапія
УЗД – ультразвукова діагностика
ТІ – тепловий індекс
МІ – механічний індекс
МН – мембранний гідрофон
СН – капсульний гідрофон
НН – голковий гідрофон
ФОН – волоконно-оптичний гідрофон
PVDF – полівінілденфторид
НІТУ – терапевтичний ультразвук високої інтенсивності
ПП – підсилювач потужності
СКВ – середній квадратичний відхил
НМІ – національний метрологічний інститут
КПППГ – координатно-поворотний пристрій позиціонування гідрофонів
НДЕТУ AUV-02-2018 – національний державний первинний еталон одиниці
ультразвукового тиску у водному середовищі

ВСТУП

Ультразвук відіграє важливу роль у різних галузях життєдіяльності людини, а саме:

- у промислових процесах, таких як очищення, зварювання, різання, випробування, вимірювання, неруйнівний контроль та моніторинг;
- у медицині: ультразвукова діагностика, терапія, доплерографія, ехокардіографія, літотрипсія;
- у науці: вивчення властивостей матеріалів, вимірювання відстаней, виявлення об'єктів та інші застосування ультразвукових сенсорів, отримання високо роздільних зображень мікроскопічних об'єктів;
- у військовій справі: виявлення дефектів під час виготовлення боєприпасів, тактична медицина, підводна навігація.

До переваг ультразвукових вимірювань відносять [1]:

- *неінвазивність* – ультразвукові вимірювання проводять зовнішньо, що дозволяє уникнути втручання в робочий процес;
- *точність* – наприклад, ультразвукові витратоміри забезпечують високу точність вимірювань, особливо за правильного монтажу.
- *широкий спектр застосувань* - вимірювання проводять в різних галузях, таких як водопостачання, нафтогазова промисловість, хімічна промисловість, медицина та інші.

У промисловості ультразвук використовують для контролю та огляду витоків рідин та газів, контролю стану та аналізу якості підшипників, виявлення кавітації у насосах, для випробування на герметичність, вимірювання товщини стінок резервуарів та труб, вимірювання потоку рідин.

На сьогодні ультразвук найширше застосовують у повсякденному житті саме в медицині — для ультразвукової діагностики, терапії та хірургії. Ці напрями представлені широким спектром спеціалізованого медичного обладнання як іноземного, так і вітчизняного виробництва.

Ультразвукова діагностика (УЗД) - це неінвазивне дослідження організму або внутрішньої структури різних об'єктів і процесів, що відбуваються в них, за допомогою ультразвукових хвиль. Принцип роботи УЗД обладнання базується на п'єзоелектричному ефекті, коли спеціальний сенсор реєструє відбиті від тканин тіла та границь між ними ультразвукові хвилі, а отримана інформація виводиться у вигляді графічної картинки на екран. Ультразвукове діагностичне обладнання (УЗД) зазвичай працює в діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц, що дозволяє адаптувати глибину проникнення та роздільну здатність зображення залежно від клінічних потреб. При цьому частоти у діапазоні від 1 МГц до 6 МГц забезпечують краще проникнення в глибокі тканини, а в діапазоні від 7 МГц до 10 МГц забезпечують кращу роздільну здатність для дослідження поверхневих структур. Цей метод діагностування є досить безпечним та дозволяє отримати детальну інформацію про структуру органів та тканин людини [2].

Ультразвукова терапія (УЗТ) – це метод фізіотерапії, що використовує ультразвукові хвилі частотою від 20 кГц до 3000 кГц, які застосовують у безперервному та в імпульсному режимах роботи обладнання. Ультразвукові хвилі проникають глибоко в м'які тканини тіла людини, та за рахунок механічної, термічної, хімічної дії біоструму активізують захисні реакції організму і підвищують імунітет. УЗТ, наприклад, стимулює згортання крові і лімфи, має виражену протибольову, спазмолітичну, протизапальну дію, а також прискорює процеси відновлення уражених тканин [3].

Акустична енергія вводиться в тіло людини за допомогою ультразвукового випромінювача, що є частиною ультразвукового медичного обладнання (УМО). Для виконання різних медичних завдань випромінювач генерує ультразвукові сигнали з різною частотою та інтенсивністю, а в режимі активного сканування може працювати за принципом радара або сонара. Основними характеристиками ультразвукових випромінювачів УМО, які впливають на якість дослідження є: фізичні розміри, робоча частота випромінювання, довжина хвилі на частоті випромінювання, потужність випромінювання, інтенсивність випромінювання, ультразвуковий тиск випромінювання. Наприклад, ультразвук не може виявляти об'єкти, менші за розмірами від довжини хвилі, а розсіювання і загасання

ультразвуку залежить від довжини хвилі, її співвідношення з фізичними розмірами випромінювача та потужності (інтенсивності) сигналу випромінювання [4].

Попри численні переваги використання ультразвуку в медицині, існують і його недоліки. Зокрема, УЗД і УЗТ залежать від досвіду та кваліфікації оператора, а також можуть впливати на тканини – інтенсивний ультразвук здатен спричиняти як тепловий, так і механічний вплив. Тому важливо, щоб акустичні параметри випромінювачів УМО, такі як потужність, інтенсивність та тиск, були точно охарактеризовані. Це необхідно не лише для оцінювання безпеки й ефективності медичних процедур, але й для відповідності законодавчим та нормативним вимогам.

У міжнародних стандартах зазначено необхідність проведення вимірювання параметрів акустичного виходу ультразвукового медичного обладнання для визначення характеристик УМО [5-7]. Зокрема, вимірювання миттєвого акустичного тиску, $p(t)$, пікового тиску стиснення, P_c , пікового тиску розрідження, P_r , середньоквадратичного акустичного тиску, P_{rms} ; інтегралу імпульсного квадратичного тиску, P_{ppsi} , який визначають як інтеграл від $p^2(t)$ по тривалості імпульсному сигналу. Додатковими величинами, які можна обчислити з акустичних вимірювань є тривалість імпульсу, акустична робоча частота, миттєва інтенсивність, $I(t)$, просторово-пікова середньочасова інтенсивність, I_{spta} , і просторово-пікова середньоімпульсна інтенсивність, I_{sppa} . Усі ці величини використовують для оцінювання біологічних ефектів і безпеки ультразвуку в двох основних категоріях: теплових і нетеплових. Усереднені в часі та середньоквадратичні величини пов'язані з тепловими ефектами, тоді як пікові значення у часі та середні імпульсні значення — з нетепловими ефектами. Для оцінювання біоефектів у цих двох категоріях впроваджено індекси - тепловий індекс (ТІ) та механічний індекс (МІ) – які відображає більшість сучасного ультразвукового медичного обладнання [8].

Контроль та визначення параметрів акустичного виходу ультразвукового медичного обладнання проводять шляхом сканування ультразвукового поля

випромінювачів за допомогою гідрофона. Гідрофони – це пристрої, які перетворюють ультразвуковий тиск у напругу, і відіграють ключову роль в ультразвукових вимірюваннях. Для забезпечення точності, надійності та відтворюваності вимірювань ультразвукових сигналів, гідрофони мають бути калібровані, що зумовлено такими причинами:

- з часом характеристики гідрофонів змінюються через зношення, механічні впливи або вплив довкілля (наприклад, температури, тиску, умов середовища застосування), тому періодичне калібрування допомагає враховувати ці зміни;
- калібровані гідрофони забезпечують відтворюваність результатів, отриманих різними пристроями або за різних умов.

Актуальність теми.

Через величезний спектр УМО закордонних і вітчизняних виробників в Україні існує потреба як у системах для вимірювання параметрів акустичного виходу ультразвукових випромінювачів під час процедур оцінки відповідності та калібрування, так і у створенні еталонної бази для проведення калібрування гідрофонів з метою забезпечення єдності та простежуваності ультразвукових вимірювань в Україні та визнання їх результатів на міжнародному рівні.

До 2017 р. в Україні не було ні первинного, ні вторинного еталонів одиниці ультразвукового тиску, що не давало змоги проводити калібрування гідрофонів в Україні та забезпечити простежуваність вимірювань параметрів акустичного виходу УМО. Створення у 2017 році національного державного первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі НДЕТУ AUV-02-2018 частково вирішило цю проблему. Однак, лише створення еталона не забезпечує простежуваність ультразвукових вимірювань. Для визнання еталона та результатів калібрування на ньому міжнародною метрологічною спільнотою, необхідно встановити ступінь еквівалентності еталона НДЕТУ AUV-02-2018 з аналогічними еталонами інших держав за допомогою звірення.

Для успішного проходження звірення актуальним залишається питання підвищення точності еталона НДЕТУ AUV-02-2018, шляхом зменшення його розширеної невизначеності вимірювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в Державному підприємстві "Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем" в рамках науково-дослідних робіт: «Створення державного первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі» (державний реєстраційний номер: № 0117U004690, 2017), «Дослідження стабільності відтворення та зберігання одиниць вимірювання державними первинними еталонами, що зберігаються в державному підприємстві "Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем"» (державні реєстраційні номери №[0118U004979](#), № [0119U001742](#), № [0120U104001](#), № [0121U111759](#), № [0122U002401](#), 2018-2022 роки).

Мета і завдання дослідження.

Об'єктом дослідження є процес калібрування гідрофонів на національному державному первинному еталоні одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі НДЕТУ AUV-02-2018.

Предмет дослідження — пошук шляхів підвищення точності калібрування гідрофонів у водному середовищі, а відтак удосконалення методу відтворення одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі.

Метою роботи є:

- підвищення точності калібрування гідрофонів на національному державному первинному еталоні одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі НДЕТУ AUV-02-2018, за результатами аналізу дослідження та шляхів зменшення розширеної невизначеності еталона;
- підготовка еталона до міжнародних звірень.

Завдання роботи:

- 1) провести порівняльний аналіз методів калібрування гідрофона та обрати оптимальний метод за критерієм досягнення необхідного рівня невизначеності при мінімальних фінансових затратах;
- 2) ідентифікувати та оцінити джерела невизначеності вимірювань під час калібрування гідрофона відповідно до обраного методу відтворення;
- 3) дослідити вплив параметрів ультразвукового перетворювача на результати калібрування гідрофона;
- 4) проаналізувати коефіцієнти дифракційних втрат для ультразвукового перетворювача та гідрофона, з метою зменшення їх стандартної невизначеності;
- 5) порівняти результати калібрування гідрофона на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 з результатами калібрування на аналогічному еталоні іншої країни.

Методи дослідження. У роботі використано теоретичні та експериментальні методи дослідження, що ґрунтуються на теорії поширення ультразвукових хвиль у вільному полі; методах диференційного та інтегрального числення; теорії ймовірності та математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. За результатами аналізу математичної моделі калібрування гідрофонів, встановлено, що домінуючими складовими невизначеності відтворення одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі, є неточність визначення ефективної площі ультразвукового перетворювача, визначення границь похибок коефіцієнтів дифракційних втрат і визначення вимірювальної відстані випромінювач - приймач.

2. Вперше запропоновано удосконалену математичну модель передавальної характеристики гідрофона, з якої вилучено параметр струм збудження УП, де струм короткого замикання використано як поправку до напруги відбитого від рефлектора ультразвукового сигналу, яку вимірюють на виході УП.

3. Розроблено та адаптовано алгоритми дослідження ефективної площі та ефективного радіусу ультразвукового перетворювача з метою підвищення точності визначення передавальної характеристики гідрофона.

Особистий внесок здобувача.

Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень, які спрямовані на підвищення точності еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі (НДЕТУ АUV-02-2018), отримано автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: [9,13] – формування структури еталона та його функціональної схеми, вибір оптимального методу калібрування та проведення експериментальних досліджень складових еталона, дослідження метрологічних характеристик еталона; [10] – участь у розробленні програмного забезпечення, проведення вимірювань та опрацювання отриманих результатів; [11,20] – участь у розробленні програмного забезпечення, проведення вимірювань, опрацювання та аналіз отриманих результатів; [12] – проведення калібрування гідрофонів, розрахунок невизначеності вимірювання, апробація отриманих результатів калібрування; [14] – дослідження сучасного стану і розвитку акустичних величин в Україні; [15,16] – дослідження та аналіз національної системи забезпечення єдності та простежуваності вимірювань ультразвукового тиску та потужності ультразвуку в водному середовищі в Україні; [17,18] – оцінювання впливу електроакустичної провідності та швидкості розповсюдження звукової хвилі на невизначеність вимірювання потужності ультразвуку; [19] – обґрунтування необхідності впровадження національних стандартів та розробка підходів до їх гармонізації з міжнародною практикою у сфері ультразвукових вимірювань.

Апробація результатів дисертації.

Ключові результати досліджень були представлені на таких конференціях: XI міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» (9-11 жовтня 2018 року, м. Харків); V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement 2019» (29 січня - 2 лютого 2019 року, смт. Славське); Міжнародна

конференція метрологів МКМ'2019: XXIII Міжнародного семінару метрологів (МСМ'2019) до 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій (10–12 вересня 2019 року, Львів); VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2020» (4-7 лютого 2020 року, смт. Славське); V Міжнародна науково-практична конференція: «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (20–21 травня 2021 року, м. Львів); II Міжнародна науково-практична конференція: Інформаційно-вимірювальні технології IBT-2024 (13–14 листопада 2024 року, м. Львів).

Публікації.

За матеріалами дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них: 4 статті у наукових фахових виданнях України [9-12] та 8 тез конференцій [13-20].

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, у яких викладені результати досліджень дисертанта, а також загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків, 47 рисунків та 29 таблиць. Робота викладена на 121 сторінках (повний обсяг разом з літературою – 145 сторінок), бібліографічний список містить 68 найменувань публікацій у вітчизняних та закордонних виданнях.

У **вступі** визначено актуальність теми дослідження, сформульовані мета і задачі роботи, наведено методи дослідження, визначена наукова новизна і практичне значення одержаних результатів та подано короткий огляд змісту дисертації.

У **першому розділі** представлено огляд методів калібрування гідрофонів у водному середовищі та типів гідрофонів. Детально описано схему калібрування для кожного з методів, включаючи їх переваги та недоліки. Особлива увага приділена аналізу точності, складності реалізації та застосовності кожного методу в різних умовах експлуатації. Зроблено висновки щодо найбільш

ефективних підходів до калібрування залежно від типу гідрофона та вимог до точності вимірювань у водному середовищі.

У **другому розділі** описано реалізацію обраного методу калібрування з детальним розглядом технічних характеристик та умов проведення калібрування. Виведено математичну модель методу взаємності із двома перетворювачами. Визначено та описано основні складові невизначеності методу калібрування гідрофона. На основі цих складових складено бюджет невизначеності, що дозволяє оцінити сумарну невизначеність калібрування гідрофона, забезпечуючи надійну оцінку результатів.

Результати досліджень цього розділу опубліковано у праці [9].

У **третьому розділі** запропоновано та реалізовано методи вимірювання ефективної площі УП та ефективного радіусу УП. Отримано значення ефективних площ випромінювання УП та ефективного радіусу УП, які входять до складу еталона НДЕТУ-AUV-02-2018 на робочих частотах, та оцінена їх невизначеність. Проведено порівняльний аналіз розрахунку коефіцієнтів дифракційних втрат двома методами та визначено їх границю похибки. Виміряно електричні параметри УП та підсилювача потужності з метою дослідження коректності застосування коефіцієнта шунтування, як поправки у математичній моделі.

Результати досліджень цього розділу опубліковано у працях [10, 11].

У **четвертому розділі** представлено результати калібрування гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 (Україна) і у НМІ РТВ (Німеччина) та виконано їх порівняння з метою перевірки коректності застосування удосконаленої математичної моделі передавальної характеристики гідрофона, доцільності заміни геометричних параметрів ультразвукового перетворювача (радіуса та площі) на ефективний радіус і ефективну площу, та зменшення стандартної невизначеності коефіцієнтів дифракційних втрат.

Результати досліджень цього розділу опубліковано у праці [12].

Дисертаційна робота завершується **Висновками, Списком використаних джерел та Додатками**.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Реалізовано методи вимірювання ефективного радіусу та ефективної площі ультразвукових перетворювачів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018.

2. Проведено порівняльний аналіз методів розрахунку коефіцієнтів дифракційних втрат та зменшено їх вклад у сумарну стандартну невизначеність калібрування гідрофона на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018.

3. Зменшено розширену невизначеність еталона НДЕТУ AUV-02-2018 з 14 % до 9 %.

4. Підготовлено еталон НДЕТУ AUV-02-2018 до міжнародних звірень шляхом порівняння результатів калібрування гідрофонів з НМІ РТВ Німеччина.

Результати роботи використано для забезпечення єдності вимірювань одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі та їх простежуваності в Україні.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ГІДРОФОНІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

1.1 Гідрофони

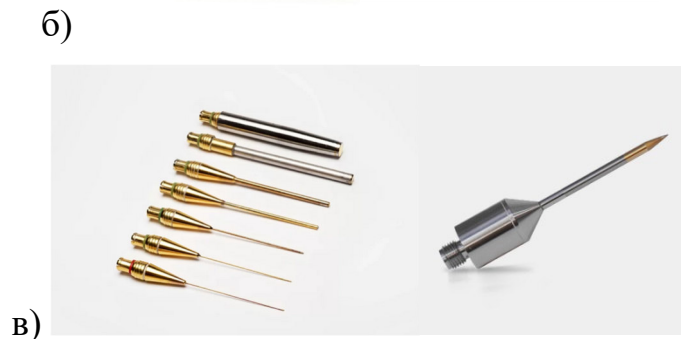
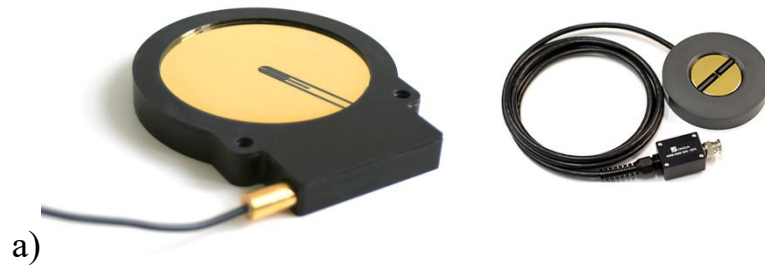
Потреба у кількісних вимірах часових та просторових характеристик акустичних полів, що створює медичне ультразвукове обладнання, привело до розроблення мініатюрних гідрофонів різної конструкції, які реагують на тиск в ультразвуковому полі.

Ідеальний гідрофон повинен мати такі властивості: невеликий розмір, високу чутливість, всенаправленість, стабільність, лінійність та широкосмуговий частотний діапазон.

На практиці створити гідрофони з усіма необхідними характеристиками неможливо. Активні елементи ультразвукових гідрофонів зазвичай мають діаметр від 0,1 мм до 1,0 мм, що робить їх сильно спрямованими, через що вирівнювання (позиціонування) під час калібрування стає критично важливим. Менший активний елемент означає меншу чутливість (зазвичай менше 0,1 мкВ/Па), тому гідрофони часто використовують разом із попередніми підсилювачами для підвищення рівня сигналу і зниження імпедансу, оскільки вихідний імпеданс гідрофона є досить високим. Деякі конструкції гідрофона схильні до акустичних резонансів, тому важко досягти рівномірної частотної характеристики чутливості гідрофона у широкому діапазоні частот. Гідрофони, які використовують без попередніх підсилювачів, часто мають нерівномірну частотну характеристику, спричинену електричними резонансами у кабелях [21].

На сьогодні, найбільш поширеними є такі типи гідрофонів:

- мембранний гідрофон (МН) (рисунок 1.1, а);
- капсульний гідрофон (СН) (рисунок 1.1, б);
- голковий гідрофон (НН) (рисунок 1.1, в);
- волоконно-оптичний гідрофон (ФОН) (рисунок 1.1, г).



а – мембранний, б – капсульний, в – голковий, г – волоконно-оптичний

Рисунок 1.1 – Типи гідрофонів

Усі гідрофони мають чутливість (В/Па), яка залежить як від частоти сигналу, так і від напрямку падіння ультразвукового тиску відносно осі гідрофона. Діаграма спрямованості гідрофона значною мірою визначається

розміром і формою його активного елемента відносно довжини хвилі. Частотна характеристика гідрофона залежить в основному від товщини його активного елемента і радіальної дифракції. У таблиці 1.1 наведено властивості різних типів гідрофонів [22]. Гідрофони у таблиці впорядковані згори донизу відповідно до зростаючого впливу явища дифракції на їхню нижню частотну характеристику.

Таблиця 1.1 – Характеристики гідрофонів

Тип гідрофона	Розмір активного елемента, мкм	Максимальний тиск, МПа	Максимальна частота, МГц
Мембранний гідрофон (МН)	75-1000	75	100
Капсульний гідрофон (СН)	85-400	10	40
Голковий гідрофон (НН)	40-4000	48	20
Волоконно-оптичний гідрофон (ФОН)	10-125	100	100

1.1.1 Мембранні гідрофони (МН)

Концепція для МН була запропонована в 1980-х роках [23]. Тонка плівка п'єзоелектричного полімеру (зазвичай полівінілденфториду, також відомого як PVDF) натягнута на опорне кільце та поляризована лише в області активного елемента. Спочатку МН мали активні елементи діаметром $\geq 0,5$ мм, проте з переходом до більш високочастотних вимірювань були розроблені МН з активними елементами діаметром 0,2 мм [24]. Вимірювання на дуже високих частотах (> 20 МГц) вимагали ще менших діаметрів активних елементів, що спричинило появу МН з діаметром менше 40 мкм [25].

Одношарову плівку (див. рис. 1.1, а) з електродами з обох боків називають компланарним МН. Ранні пристрої такого типу мали відносно низьку чутливість, особливо МН без вбудованого попереднього підсилювача, і були чутливі до електромагнітного шуму. Для вирішення цих обох проблем були розроблені біламінарні МН. Біламінарні МН мають покращене екранування, яке забезпечене

двома заземленими площинами, що призвело до зменшення електромагнітного шуму [26].

Поява диференційних підсилювачів із широкою смугою пропускання, які відсікають синфазний сигнал, дозволила розробити компланарні МН зі смугою пропускання до 140 МГц [27]. Застосування поглинаючих підкладок в МН підвищує їх стійкість і полегшує їх використання для кількісного оцінювання терапевтичних полів високої інтенсивності (HITU) [28]. А широкосмугова частотна характеристика МН, яка в основному залежить від товщини плівки, та довгострокова стабільність чутливості МН стали «золотим» стандартом для забезпечення простежуваності вимірювань на первинних еталонах ультразвукового тиску.

1.1.2 Капсульний гідрофон (СН)

Капсульні гідрофони (рисунок 1.1, б) були розроблені, щоб забезпечити менший фізичний розмір у порівнянні з МН, а також зменшити деякі дифракційні артефакти, які присутні в конструкціях НН або FОН [29]. СН також містять мембрану з PVDF, яка утримується в натягнутому стані на кінці акустично поглинаючої полімерної структури. Еліпсоїдна форма цих гідрофонів зменшує радіальні дифракційні моди, що забезпечує рівномірну чутливість у широкому частотному діапазоні (МГц), хоча їх низько частотна характеристика чутливості не така рівномірна, як наприклад у МН. Рівномірність чутливості СН у діапазоні частот досягається зменшенням артефактів радіальної дифракції шляхом розширення геометричного профілю гідрофона на відносно велику площу (порівняно з довжиною акустичної хвилі) і згладжуванням країв [29]. Капсульні гідрофони мають діаметр активного елемента у діапазоні від 0,085 мм до 0,4 мм.

1.1.3 Голковий гідрофон (НН)

Голкові гідрофони (рисунок 1.1, в) були розроблені на початку 1980-х років і базуються на п'єзоелектричному елементі, встановленому на кінчику циліндричного стрижня. Активні елементи можуть бути як п'єзополімерними

[30] так і п'єзокерамічними [31]. На частотну характеристику НН впливає низка чинників [32]:

- на низьких частотах домінує явище дифракції під впливом поперечного перерізу розсіювання циліндричного стрижня в частотній характеристиці чутливості НН;
- на високих частотах резонанси товщини чутливого елемента та ефекти ємнісного дільника вздовж циліндричного стрижня спричиняють більш значне зниження чутливості НН.

Конструкції НН доступні з діаметрами сенсорів у діапазоні від 10 мікрон до кількох міліметрів. Як і СН, НН мають компактні розміри, що робить їх більш зручними ніж МН для багатьох вимірювань, наприклад, поблизу випромінюючої поверхні різних типів ультразвукових перетворювачів. Станом на сьогодні НН мають ширший діапазон розмірів чутливих елементів порівняно з СН.

1.1.4 Волоконно-оптичний гідрофон (ФОН)

Існують різноманітні волоконно-оптичні гідрофони, що містять зовнішні (побудовані на дистальному кінчику оптичного волокна) і внутрішні (сконструйовані в межах довжини волокна) сенсорні механізми. У ФОН відбиваючого типу лазерне світло передається вздовж оптичного волокна, кінчик якого занурений у рідину, де потрібно виміряти тиск [33]. Окрім передавання світла, апаратне забезпечення ФОН також отримує світло, яке відбивається на кінці волокна та поширюється вздовж волокна назад до оптичного джерела. Коефіцієнт відбиття на межі розділу волокно/рідина залежить від показників заломлення волокна та рідини. Ультразвукові хвилі, що падають на наконечник ФОН, викликають локальні зміни щільності рідини та, відповідно, її показника заломлення. Отже, існують спричинені ультразвуком збурення інтенсивності відбитого світла, виявленого ФОН. Оскільки зміни показника заломлення є невеликими, то для ФОН відбиваючого типу необхідні лазери більшої потужності (клас 3В), які зазвичай використовують для вимірювання полів високого тиску, наприклад НІТУ [34]. Інтерферометричні ФОН оснащені структурою,

інтегрованою на кінчику сенсора. Це може бути інтерферометр Фабрі-Перо з полімерним розділовим шаром [35] або конструкція, сформована з пакету діелектричних шарів [36]. Інтерферометричний FON використовує фотодіод для реєстрації інтерференції між відбиттями від ближньої та дальньої границь структури на кінчику. Дія ультразвукової хвилі викликає стиснення інтерферометричної структури, що призводить до модуляції відбитого світла. За певних умов інтенсивність цього світла пропорційна миттєвому тиску. Однак стиснення/розширення інтерферометричного сенсора також може виникати внаслідок теплових ефектів [37]. Інтерферометричні FON мають вищу чутливість, ніж аналоги FON іншого принципу дії, і здатні вимірювати сигнали тиску нижче 50 кПа за допомогою лазерів меншої потужності (клас 1M). Зондовий характер FON у поєднанні з високим рівнем кругової симетрії спричиняє явище дифракції, що впливає як на частотну характеристику, так і на спрямованість [38]. Завдяки завадостійкості принципу акустично-оптичного перетворення до електромагнітних перешкод FON є ефективними для застосування тоді, коли важливо розділити акустичні сигнали та електромагнітний шум.

Для отримання надійних та достовірних результатів у будь-яких кількісних ультразвукових вимірюваннях гідрофон повинен бути відкаліброваним, тобто визначена його чутливість у діапазоні частот з вказаною розширеною невизначеністю.

1.2 Методи калібрування гідрофонів

Відповідно до [40] гідрофон може бути відкаліброваним як абсолютним (первинним), так і відносним (вторинним) методом. До абсолютних методів калібрування відносять:

- метод взаємності;
- метод планарного сканування;
- метод оптичної інтерферометрії.

Відносний метод калібрування – це метод порівняння з відкаліброваним опорним гідрофоном.

1.2.1 Метод оптичної інтерферометрії

Цей метод ґрунтується на оптичному інтерферометричному принципі. Ультразвуковий перетворювач створює акустичне поле, яке детектують, використовуючи тонку мембрану (товщиною 2 мкм), металізовану з одного боку для надання властивостей оптичного відбивання. Мембрана є достатньо тонкою, що забезпечує звукопроникність та повторювання руху акустичної хвилі. Зміщення мембрани вимірюють за допомогою оптичної інтерферометрії, а за результатами виміряного зміщення обчислюють акустичний тиск. Гідрофон встановлюють замість мембрани так, щоб акустичний центр гідрофона був розміщений в тій самій точці акустичного поля досліджуваного лазерним променем (наприклад, гелій-неоновий). Потім гідрофон калібрують, вимірюючи вихідну напругу, що відповідає відомому акустичному тиску. Для прийняттого відношення сигнал/шум на гідрофоні у широкому частотному діапазоні акустичний тиск, створюваний перетворювачем, має бути достатнім, тому у методі, як правило, використовують фокусовані ультразвукові перетворювачі.

Для плоскої хвилі амплітуду акустичного тиску p_0 обчислюють за формулою [40]:

$$p_0 = \rho \cdot c \cdot \omega \cdot \zeta, \quad (1.1)$$

де: ρ – густина вимірювальної рідини (води), кг/м³;

c – швидкість звуку у воді, м/с;

ω – колова частота, Гц;

ζ – амплітуда акустичного зміщення, м, без врахування різниці фаз між тиском та зміщенням.

Якщо не враховувати різницю фаз між тиском та зміщенням, то для заданого акустичного тиску амплітуда зміщення обернено пропорційна до частоти.

Функціональну схему методу калібрування показано на рисунку 1.2 [41].

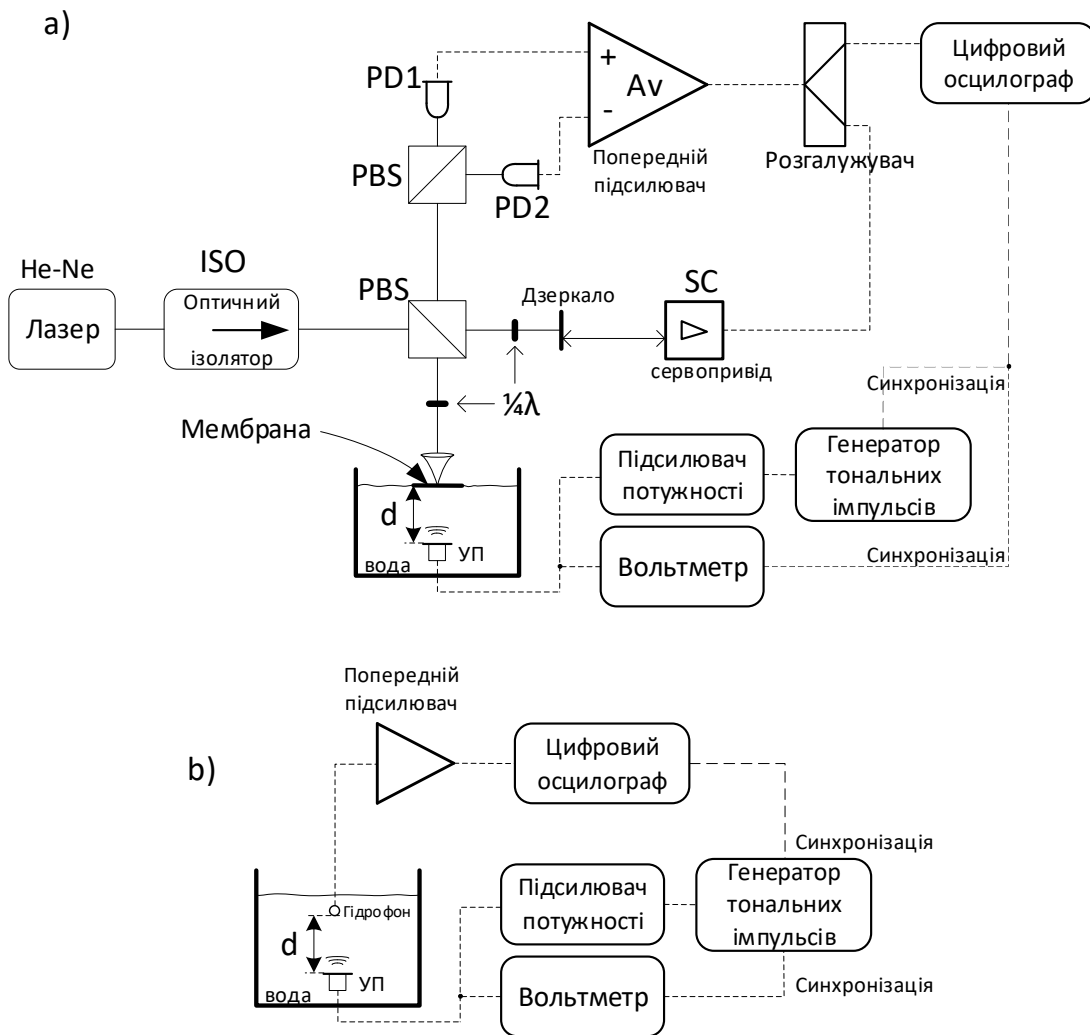


Рисунок 1.2 – Функціональна схема оптико-інтерферометричного методу калібрування

Щоб отримати значення чутливості в дискретних частотних точках, ультразвуковий перетворювач збуджують тональними імпульсними сигналами, за допомогою генератора та підсилювача потужності. Тривалість тонального імпульсного сигналу залежить від частоти, але в кожному випадку вона є набагато коротшою, ніж час проходження до всіх можливих відбивачів всередині резервуара, зокрема до поверхні води під час гідрофонних вимірювань, що може спричиняти реверберацію, яка спотворює вимірювання. Згенерована ультразвукова хвиля падає по нормалі і викликає зміщення мембрани, яке вимірюють за допомогою інтерферометра. Інтерферометр складається з лазера

(He-Ne), як джерела світла, оптичного ізолятора (ISO), поляризаційного розділювача променя (PBS) та пластини з уповільненням на чверть довжини хвилі для розділення та поєднання оптичного поля (рисунок 1.2, а). Інтерферометр стабілізують контуром сервокерування з частотою одиничного підсилення приблизно 100 Гц. У вимірювальному колі світло сфокусовано на мембрану, покриту шаром металу для поліпшення оптичного відбивання.

Схема фотодетектування реєструє вихідне оптичне поле, використовуючи два фотодіоди (PD1, PD2) та диференційний трансїмпедансний підсилювач (Av). Така конфігурація знижує синфазний шум і підсилює фотострум для підвищення точності вимірювань. Вихідну напругу U_s вимірюють цифровим осцилографом, в часовій області з широкою смугою пропускання (> 100 МГц). Зміщення ζ обчислюють з виміряних фотострумів за формулою [41]:

$$\zeta = \frac{\lambda \cdot U_s}{T(f) \cdot 2\pi \cdot \hat{U}}, \quad (1.2)$$

де: λ – довжина оптичної хвилі, м;

$T(f)$ – коефіцієнт звукового пропускання мембрани;

U_s – напруга сигналу отримана з фотодетектора, В;

$\hat{U}$ – розмах напруги повної інтерференційної смуги, виміряної на виході підсилювача Av, В.

Позиціонування ультразвукового перетворювача здійснюють за допомогою лінійного переміщення за трьома осями та повороту за двома осями. Точку лазерного променя налаштовують у фокусі перпендикулярному до осі променя, який визначають двовимірними вимірюваннями тиску вздовж двох осей на різних відстанях від перетворювача. Кут між мембраною та напрямком поширення звуку регулюють, використовуючи юстований лазерний промінь як опорний. Після накопичення опорних даних мембрану витягають, а гідрофон, який калібрують, закріплюють у місці, де була точка фокусування лазерного променя. Додають необхідну кількість води, щоб занурити гідрофон. Гідрофон з'єднують з входом попереднього підсилювача V. Вимірювання повторюють за ідентичних умов збудження.

Чутливість гідрофона M_L обчислюють за формулою [41]:

$$M_L = \frac{A_V(f) \cdot F_{sp}(f)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c \cdot \rho \cdot V(f)} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot T(f) \cdot \hat{U}}{\lambda} \cdot \frac{U_H}{U_S}, \quad (1.3)$$

де: U_H – напруга виміряна на гідрофоні, В;

c – швидкість звуку у воді, м/с;

ρ – густина води, кг/м³;

$V(f)$ – коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача гідрофона;

$A_V(f)$ – коефіцієнт підсилення трансімпедансного підсилювача;

$F_{sp}(f)$ – поправка на просторове усереднення.

На визначення чутливості M_L впливають систематичні похибки, які треба враховувати, зокрема:

- поправку на просторове усереднення, $F_{sp}(f)$: оскільки, як і лазерний промінь, сфокусований на мембрану, так і гідрофон неможливо прийняти за точкові на частотах більше 10 МГц, тому необхідно враховувати ефект просторового усереднення. Щоб кількісно описати цей ефект, перетворювач розглядають як плоский поршень. Розподіл зміщення одержують, розраховуючи інтеграл Релея, а всі виміряні середні значення можна пов'язати з піковими значеннями тиску [41].

- коефіцієнт звукового пропускання мембрани, $T(f)$: падаюче звукове поле частково відбивається усередину фольги та металевому шару, і ця інтерференція впливає на переміщення фольги. Оскільки фазовий фронт у фокусі звукового променя є майже плоский, то для кількісного опису систематичної похибки, зумовленої цим ефектом, можна застосовувати просту резонансну модель [41] з використанням плоских хвиль. Вона дає коефіцієнт звукового пропускання $T(f)$ для зміщення, який вводять до рівняння (1.2) та (1.3);

- коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача гідрофона $V(f)$ та коефіцієнт підсилення трансімпедансного підсилювача фотодетектора $A_V(f)$ є залежними від частоти сигналу та впливають на результат визначення чутливості гідрофона, тому їх передавальні характеристики треба визначити перед вимірюваннями.

1.2.2 Метод планарного сканування

У цьому методі застосовують ультразвуковий перетворювач (УП) з плоским дисковим активним елементом та відомою вихідною потужністю на конкретній частоті f . Можна використовувати еталонний перетворювач [42], відкалібрований за допомогою методу радіаційної сили, як зазначено в ДСТУ EN 61161 [43], тобто з відомою сумарною ультразвуковою потужністю P_0 , що випромінює перетворювач на частоті f за неперервного синусоїдного електричного збудження напругою U_T .

Перетворювач та гідрофон встановлюють у резервуар для сканування та регулюють обидва так, щоб їх поверхні були перпендикулярні до осі поширення променя (z), з метою отримання максимального сигналу з гідрофона.

На перетворювач з генератора через підсилювач потужності подають тональний імпульсний сигнал, що містить достатню кількість коливань для забезпечення незмінних умов за частоти f та напруги збудження U_T . Гідрофон встановлюють на відстані $z = l$ у дальньому полі перетворювача, враховуючи поправки на просторове усереднення, спрямованість та згасання. Амплітуду вихідної напруги гідрофона $U_L(x, y, l, t)$ вимірюють у площині перпендикулярній до осі z растровим скануванням променя (див. рис. 1.3). Визначають обсяг сканованої області, враховуючи рівень шуму. Обчислюють суму квадратів напруг по площі ультразвукового променя та розраховують значення чутливості гідрофона під навантаженням на кінці кабеля на частоті f . Функціональна схема вимірювання представлена у вигляді рисунка:

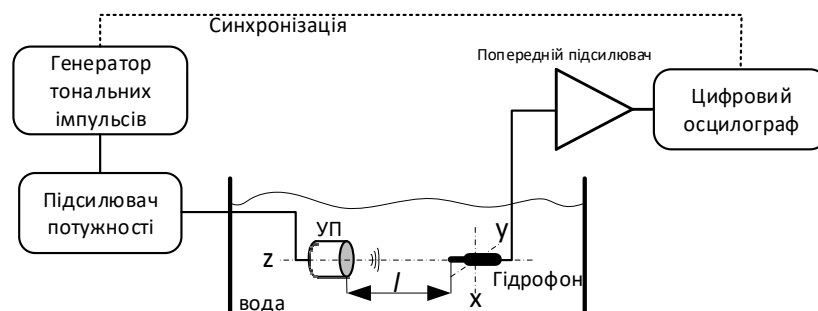


Рисунок 1.3 – Функціональна схема вимірювання методом планарного сканування

Миттєвий акустичний тиск $p(x, y, z, t)$ визначають за вимірюваною напругою на кінці кабеля $U_L(x, y, z, t)$ із співвідношення [40]:

$$p(x, y, z, t) = \frac{U_L(x, y, z, t)}{M_L}, \quad (1.4)$$

де: M_L - чутливість гідрофона під навантаженням на кінці кабеля, В/Па;

x, y, z – координати точки поля;

t – довільний момент часу, с.

У разі поширення біжучої хвилі за умов $a_t/l < 0,5$ [40], де l – осьова відстань від перетворювача, a_t – ефективний радіус перетворювача, миттєва інтенсивність може бути представлена як [44]:

$$I(x, y, z, t) = \frac{p(x, y, z, t)^2}{\rho c}, \quad (1.5)$$

де: ρ – густина вимірювального середовища (води), кг/м³;

c – швидкість звуку у воді, м/с.

Сумарну потужність ультразвукового випромінення $P(l)$, яка передається через площину перпендикулярну до осі z при $z = l$, обчислюють за формулою [40]:

$$P(l) = \iint \overline{I(x, y, l, t)} \cos \theta \, dydx, \quad (1.6)$$

де: $dydx$ – елементарна площа у площині $z = l$;

θ – кут між віссю z та напрямком поширення променя.

Інтеграл означає інтегрування по всій площині, а горизонтальна риска зверху у рівнянні (1.6) вказує на усереднене за часом значення інтенсивності.

Беручи рівняння (1.4) та (1.5) можна записати [40]:

$$\overline{I(x, y, z, t)} = \frac{\overline{U_L(x, y, z, t)^2}}{M_L^2 \cdot \rho \cdot c}, \quad (1.7)$$

де: $U_L(x, y, z, t)$ – напруга на кінці кабелю гідрофона, коли гідрофон розташований в точці (x, y, z) в момент часу t .

Враховуючи рівняння (1.6) та (1.7), чутливість мікрофона M_L під навантаженням на кінці кабелю обчислюють за формулою [40]:

$$M_L = \sqrt{\frac{1}{P(l) \cdot \rho \cdot c} \iint \overline{U_L(x, y, z, t)^2} dy dx} . \quad (1.8)$$

Строго кажучи, рівняння (1.8), яке виведено з рівняння (1.6), має стосуватися інтегрування по сферичній поверхні, відцентрованої відносно ультразвукового перетворювача. Невизначеність, яку вносять через використання планарного сканування у кожній точці сканування, є пропорційною до $\frac{1}{\cos \Theta} - 1$, де Θ – кут між віссю ультразвукового променя та лінією, що з'єднує центр ультразвукового перетворювача з опорним центром активного елемента гідрофона. За умови, що Θ на краях сканування є менший ніж 10° , невизначеність через використання планарного сканування незначна [45].

Отже, чутливість гідрофона можна визначати скануванням гідрофоном по площині в ультразвуковому промені та діленням інтегралу середнього значення квадрата сигналу гідрофона на сумарну потужність у промені.

Існує декілька способів сканування гідрофоном у площині $z = l$ в ультразвуковому промені, але найпоширеніший полягає в одержанні прямокутної системи точок дискретизації переміщенням гідрофона у двомірному растровому скануванні. Тому інтеграл $\iint \overline{U_L(x, y, z, t)^2} dy dx$ у цьому випадку можна записати як [40]:

$$\iint \overline{U_L(x, y, z, t)^2} dy dx = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \overline{U_L(x_m, y_n, l, t)^2} \Delta y \Delta x , \quad (1.9)$$

де: M та N – кількість точок дискретизації у напрямках y та x , відповідно;
 Δx та Δy – розміри кроку у напрямках x та y , відповідно.

Кількість точок дискретизації вираховують із сканування профілю променя так, щоб різниця між акустичним тиском у центрі променя та на його краю була не менше ніж 6 дБ.

Оскільки гідрофон позиціонують на відстані $z = l$, до вихідної потужності ультразвуку випромінюваного перетворювачем P_0 треба вносити поправку на згасання звуку, яку обчислюють за формулою [40]:

$$P(l) = P_0 \cdot e^{-\alpha l}, \quad (1.10)$$

де: P_0 – сумарна вихідна потужність ультразвуку, випромінювана перетворювачем, Па;

$P(l)$ – сумарна потужність ультразвукового променя на відстані l , Па;

α – коефіцієнт згасання амплітуди плоских хвиль у воді, $\text{Гц}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$.

У рівнянні (1.5) припущено, що миттєва інтенсивність пропорційна до квадрата акустичного тиску. Оцінити різницю між істинною миттєвою інтенсивністю I та інтенсивністю I_P , виведеною з квадрата акустичного тиску на осі круглого плоско-поршневого ультразвукового перетворювача, можна за рівнянням [44]:

$$\frac{I_P}{I} = \frac{2}{1 + \left(\frac{l}{a_t}\right) / \left[1 + \left(\frac{l}{a_t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (1.11)$$

Для відстаней l у діапазоні від a_t^2/λ до $3(a_t^2/\lambda)$, де a_t - ефективний радіус нефокусуючого ультразвукового перетворювача, λ – довжина ультразвукової хвилі, та в діапазоні діаметрів перетворювачів, які зазвичай використовуються (від 6 мм до 25 мм), відношення $\frac{I_P}{I}$ відрізняється від одиниці не більше ніж на 1 %. Рівняння (1.11) для оцінювання внеску від цього джерела невизначеності треба використовувати, якщо вибрано відстані, менші ніж рекомендовані.

1.2.3 Метод взаємності

Для лінійного, пасивного, взаємооберненого електроакустичного перетворювача існує добре визначена залежність між його чутливістю у вільному полі як приймача та його характеристикою за струмом як передавача.

Цю залежність для конкретної схеми розташування компонентів у системі перетворювачів виражають у термінах коефіцієнта взаємності.

Всі калібрування, що ґрунтуються на принципі взаємності, потребують використання взаємооберненого перетворювача, який може працювати як у режимі передавання, так і приймання. Якщо зміни, що виникають в акустичному полі між передаванням та прийманням відомі, то тоді характеристику під час передавання та чутливість перетворювача під час приймання сигналу можна визначити безпосередньо вимірюванням струму збудження та напруги вхідного сигналу. Перевагою цього методу є те, що необхідні акустичні параметри визначають вимірюванням лише електричних величин [40].

Існують такі різновиди методу взаємності:

- метод взаємності з трьома перетворювачами набув широкого застосування у акустиці, для його реалізації використовують три перетворювачі, хоча б один з яких має бути взаємним. Однак цей метод складно реалізувати на частотах більше 1 МГц через потребу високої точності регулювання положення перетворювачів та через складну структуру спрямованості перетворювачів. Метод рекомендовано використовувати для калібрування у діапазоні частот від 50 кГц до 1 МГц [40];

- метод самовзаємності - використовують один перетворювач та відбивач, що відповідно потребує мінімального геометричного регулювання під час вимірювань. Однак його не можна застосовувати для калібрування високочастотних гідрофонів (перетворювачів), які через свій розмір мають недостатню випромінювану акустичну потужність для отримання відбитого сигналу із адекватним співвідношенням сигнал/шум [40];

- метод взаємності з двома перетворювачами - гідрофон розміщують у відомому полі, яке формує допоміжний перетворювач, і яке попередньо кількісно оцінено за процедурою самовзаємності [40]. Цей метод здатний забезпечувати калібрування з точністю, що відповідає вимогам до характеристик, встановлених для еталонного гідрофона, і не вимагає ретельного регулювання положення компонентів, як цього потребує метод трьох перетворювачів. Метод можна застосовувати в діапазоні частот від 1 МГц до

15 МГц. Тому розглянемо метод взаємності з двома перетворювачами детальніше.

Визначення чутливості гідрофона $M_h(f)$ методом взаємності з двома перетворювачами відбувається у два етапи. На першому етапі (рисунок 1.4) методом самовзаємності визначають передавальну характеристику $S_{tr}(f)$ допоміжного ультразвукового перетворювача (УП). Випромінений допоміжним ультразвуковим перетворювачем акустичний сигнал відбивається від рефлектора Р, встановленого перпендикулярно до осі випромінювання перетворювача, і попадає назад на УП, що тепер працює у режимі приймання акустичного сигналу. На виході допоміжного перетворювача вимірюють напругу $U_1(f)$, що виникає під дією відбитого ультразвукового сигналу, та струм $I_1(f)$, який протікає через перетворювач під час випромінювання.

На другому етапі вимірювання гідрофон розміщують в акустичному полі допоміжного перетворювача УП (рисунок 1.4). Струм збудження УП на першому і на другому етапі вимірювання залишається незмінним і дорівнює $I_1(f)$. Вимірюють напругу $U_2(f)$, що виникає на виході гідрофона під дією створених допоміжним перетворювачем ультразвукових коливань [40].

Під час вимірювань гідрофон повинен знаходитись у вільному полі, тобто в звуковому полі, де вплив відбитих сигналів нехтовно малий. Гідрофон розміщують на вимірювальній відстані від поверхні допоміжного перетворювача, яка може бути в межах від 1 до 3 протяжностей ближнього поля N допоміжного перетворювача. N розраховують для кожної частоти вимірювання за формулою [40]:

$$N = \frac{a_{tr}^2}{\lambda} = \frac{f \cdot a_{tr}^2}{c}, \quad (1.12)$$

де: N - протяжність ближнього поля допоміжного перетворювача, м;

λ – довжина звукової хвилі у воді на частоті вимірювання, м;

c – швидкість звуку у воді, м/с;

f – частота сигналу, Гц;

a_{tr} – ефективний радіус допоміжного УП на частоті вимірювання, м.

Відстань d , яку проходить ультразвуковий промінь на першому і на другому етапі однакова. Її контролюють, вимірюючи час затримки прийнятого ультразвукового сигналу відносно випроміненого сигналу.

Передавальну характеристику гідрофона (чутливість) у вільному полі, за умови ідеальної плоскої хвилі, $M_h(f)$, визначають за формулою [40]:

$$M_h(f) = \frac{U_2(f)}{I_1(f)} \cdot \sqrt{\left(\frac{I_1(f) \cdot J_P}{U_1(f)}\right)}, \quad (1.13)$$

де: $U_1(f)$ – напруга відбитого від рефлектора ультразвукового сигналу виміряна на виході УП, В;

$I_1(f)$ – струм збудження УП, А;

J_P – коефіцієнт взаємності УП для плоскої хвилі;

$U_2(f)$ – напруга виміряна на виході гідрофона, В.

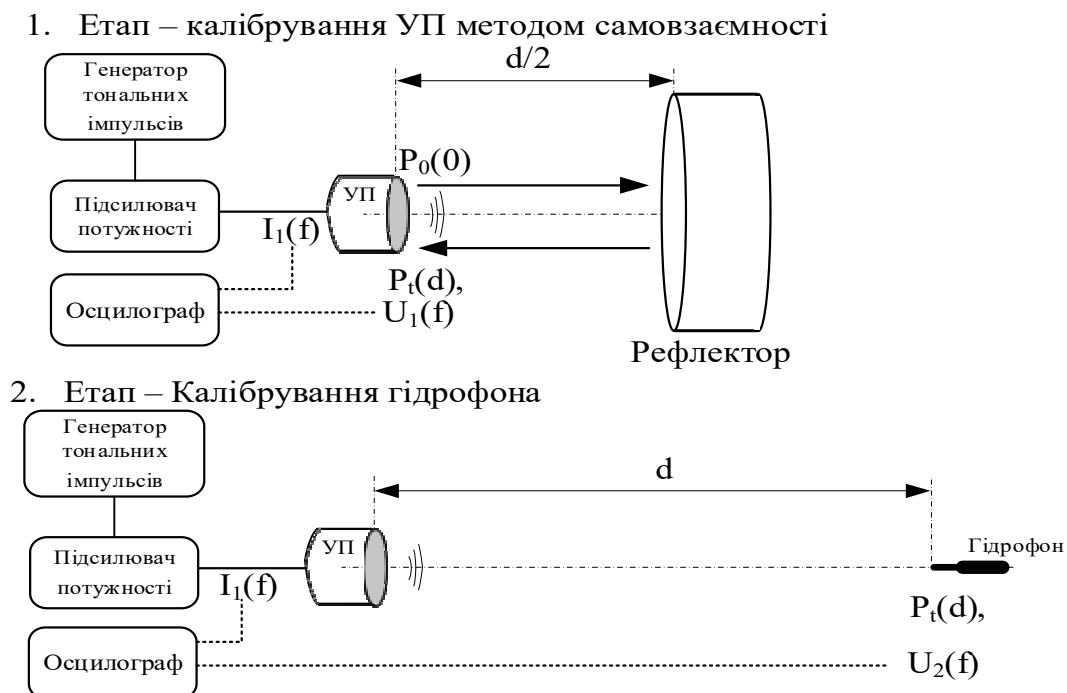


Рисунок 1.4 – Функціональна схема визначення чутливості гідрофона методом взаємності з двома перетворювачами [12]

1.2.4 Метод порівняння з відкаліброваним опорним гідрофоном

Метод порівняння полягає у визначенні чутливості випробуваного гідрофона, коли відома чутливість опорного гідрофона, або частотної характеристики чутливості випробуваного гідрофона, якщо частотна характеристика чутливості еталонного гідрофона відома [40]. Вимірювання проводять у резервуарі з водою, у полі ультразвукового випромінення за умов плоскої біжучої хвилі, яке створює допоміжний ультразвуковий перетворювач. Вимірювання проводять за ідентичних умов, тобто в тому самому положенні у полі, за тих самих умов збудження (форми хвилі та амплітуди) та за тих самих умов довкілля (наприклад, температури) тощо.

Згідно з формулою (1.4), за умови, що вимірювання проводять в одній точці, тобто ультразвуковий тиск є однаковим для обох гідрофонів, можна записати [40]:

$$\frac{U_r(f)}{M_r(f)} = \frac{U_c(f)}{M_c(f)}. \quad (1.14)$$

Звідки,

$$M_c(f) = \frac{U_c(f) \cdot M_r(f)}{U_r(f)} \cdot \frac{G_r}{G_c}, \quad (1.15)$$

де: $M_r(f)$ – чутливість опорного гідрофона, В/Па;

$U_r(f)$ – напруга на опорному гідрофоні розміщеному у точці вимірювання, В;

$U_c(f)$ – напруга на випробуваному гідрофоні розміщеному у точці вимірювання, В;

$M_c(f)$ – чутливість випробуваного гідрофона, В/Па;

G_r, G_c – коефіцієнти дифракційних втрат для опорного та випробуваного гідрофонів відповідно.

1.3 Висновок до розділу

Проведений аналіз методів калібрування гідрофонів наведених вище, разом із типовими значеннями невизначеності, які можуть бути отримані під час калібрування в діапазонах частот, відповідно до потреб ультразвукового медичного обладнання, яке використовується в Україні (таблиця 1.2).

Вибір методу калібрування гідрофона зроблено з огляду на необхідну точність та зручність застосування методу. Наприклад, метод оптичної інтерферометрії є абсолютним первинним методом, за допомогою якого можна досягти мінімально можливого значення невизначеності результату калібрування, однак, він є непростий з огляду на вимоги до устаткування та вимірювального обладнання, а його реалізація може бути складною та дорогою. Метод порівняння з використанням опорного гідрофона не є абсолютним, і потребує калібрування опорного гідрофона у закордонній лабораторії, що в свою чергу є досить вартісною процедурою. Серед інших методів калібрування гідрофонів найпоширенішими є методи взаємності та метод планарного сканування.

Таблиця 1.2 – Методи калібрування гідрофонів

№	Метод	Діапазон частот	Типова невизначеність, %
1	Метод взаємності з двома перетворювачами	від 1 МГц до 2 МГц	12
		до 10 МГц	10
		до 15 МГц	16
	Метод взаємності з трьома перетворювачами	від 50 кГц до 100 кГц	5
		до 500 кГц	6
		до 1 МГц	10
2	Метод планарного сканування у вільному полі	від 500 кГц до 10 МГц	10
		до 15 МГц	20
3	Метод оптичної інтерферометрії у вільному полі	від 200 кГц до 1 МГц	6
		до 10 МГц	7
		до 20 МГц	8
4	Метод порівняння з використанням опорного гідрофона	до 1 МГц	15
		до 10 МГц	11
		до 20 МГц	11

У методі планарного сканування необхідно мати еталонний ультразвуковий перетворювач, сумарна ультразвукова потужність якого відома. У цьому методі процес калібрування гідрофона є досить тривалим у часі та вимагає сканувальної установки для переміщення гідрофона відносно перетворювача.

Як видно з таблиці 1.2, метод взаємності з трьома перетворювачами, хоч і є точним, але не охоплює діапазон частот, який необхідний для використання гідрофона під час вимірювань параметрів ультразвукового медичного обладнання.

Метод взаємності з двома перетворювачами можна реалізувати використовуючи відносно просту експериментальну установку порівняно з методом оптичної інтерферометрії, і він не передбачає складних вимірювальних процедур. Переважно вимірювання у методі є електричними, а до результатів вимірювання необхідно застосовувати електричні та акустичні поправки. Цей метод є технічно доступний і дешевший у реалізації порівняно з інтерферометричним методом.

Тому, з огляду на потреби та можливості економіки України, для реалізації у еталоні обрано метод взаємності з двома перетворювачами, який є одним з кращих для калібрування гідрофонів завдяки достатній точності, надійності, універсальності та відносній простоті реалізації.

2 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ВЗАЄМНОСТІ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ ГІДРОФОНІВ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ДЖЕРЕЛ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Національні та міжнародні нормативні документи вимагають визначення акустичних вихідних параметрів ультразвукового медичного обладнання відповідно до міжнародних стандартів [48-50]. Для проведення таких вимірювань з відтворюваними результатами необхідно мати гідрофони з калібруваннями, які простежуються до національного еталону. Тому, створення еталона одиниці ультразвукового тиску у воді для проведення калібрування гідрофонів є актуальною задачею.

2.1 Реалізація методу взаємності з двома перетворювачами

У 2017 році створено національний державний первинний еталон одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі НДЕТУ AUV-02-2018 [9] на основі методу взаємності з двома перетворювачами.

Основними елементами еталона НДЕТУ AUV-02-2018 є:

- координатно-поворотний пристрій позиціонування гідрофонів (КПППГ);
- випромінювальний тракт, який складається з генератора сигналів, підсилювача потужності та комплекту допоміжних ультразвукових перетворювачів;
- вимірювальний тракт, що складається з цифрового осцилографа зі струмовим пробником;
- рефлектор, який використовують для калібрування допоміжного перетворювача методом самовзаємності;
- вимірювальна ємність (об'єм - 150 л);
- персональний комп'ютер зі спеціальним програмним забезпеченням для керування КПППГ та розрахунку дифракційних поправок G_2 та G_1 ;
- система підготування води.

Загальний вигляд національного державного первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі подано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Національний державний первинний еталон одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі НДЕТУ АUV-02-2018

Функціональна схема еталона НДЕТУ АUV-02-2018 наведена на рисунку 2.2.

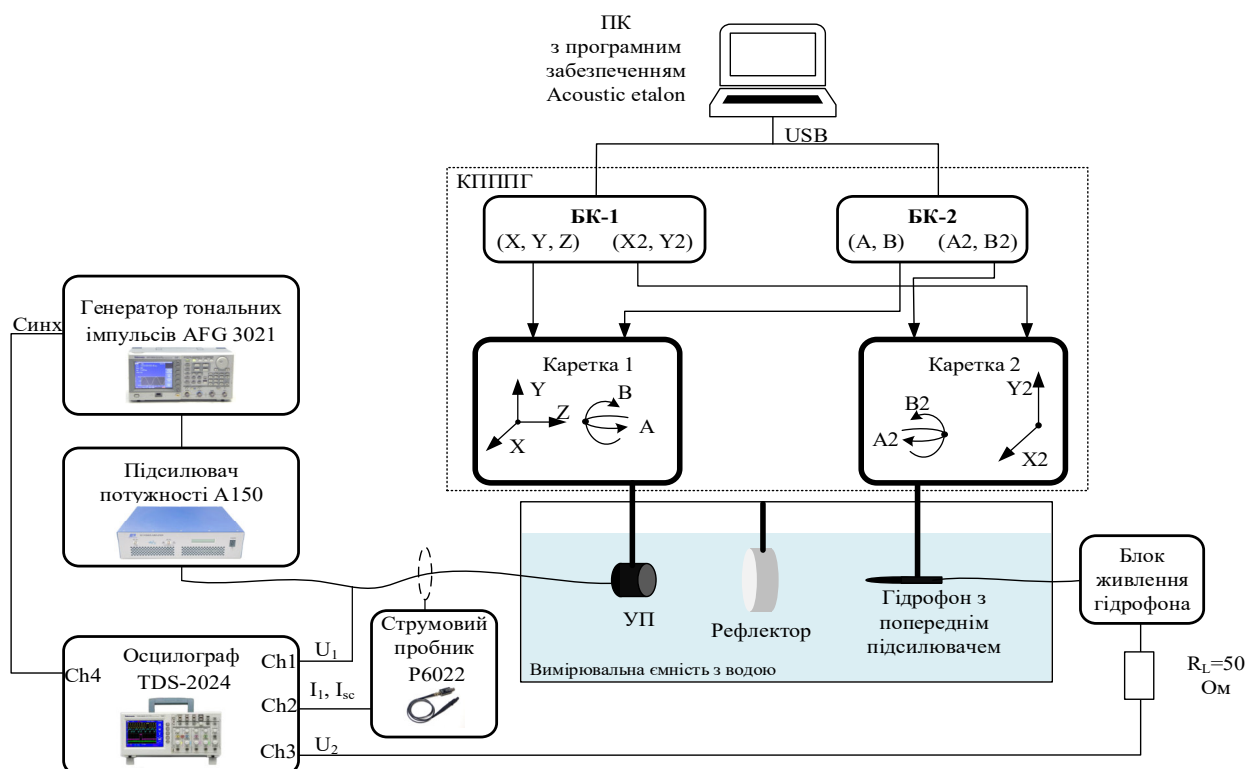


Рисунок 2.2 – Функціональна схема еталона НДЕТУ АUV-02-2018

Координатно-поворотний пристрій позиціонування гідрофонів (КПППГ)

КПППГ призначений для просторового позиціонування (розміщення і взаємного орієнтування) у вимірювальній ємності на заданій відстані один від одного гідрофона та допоміжного перетворювача, а також допоміжного перетворювача і рефлектора. КПППГ складається з пристрою позиціонування, який включає в себе каретку 1 та 2, на які монтують поворотні штанги 1, 2, блоків керування БК-1 та БК-2 та програмного забезпечення «Acoustic etalon».

КПППГ забезпечує переміщення гідрофона та допоміжного перетворювача, встановлених в адаптери на поворотних штангах каретки 1 та каретки 2:

Каретка 1 забезпечує :

- лінійне переміщення вздовж осі X від 0 до 16 см;
- лінійне переміщення вздовж осі Y від 0 до 50 см;
- лінійне переміщення вздовж осі Z від 0 до 90 см;
- обертовий рух навколо осі A та B від -30 до +30 град.

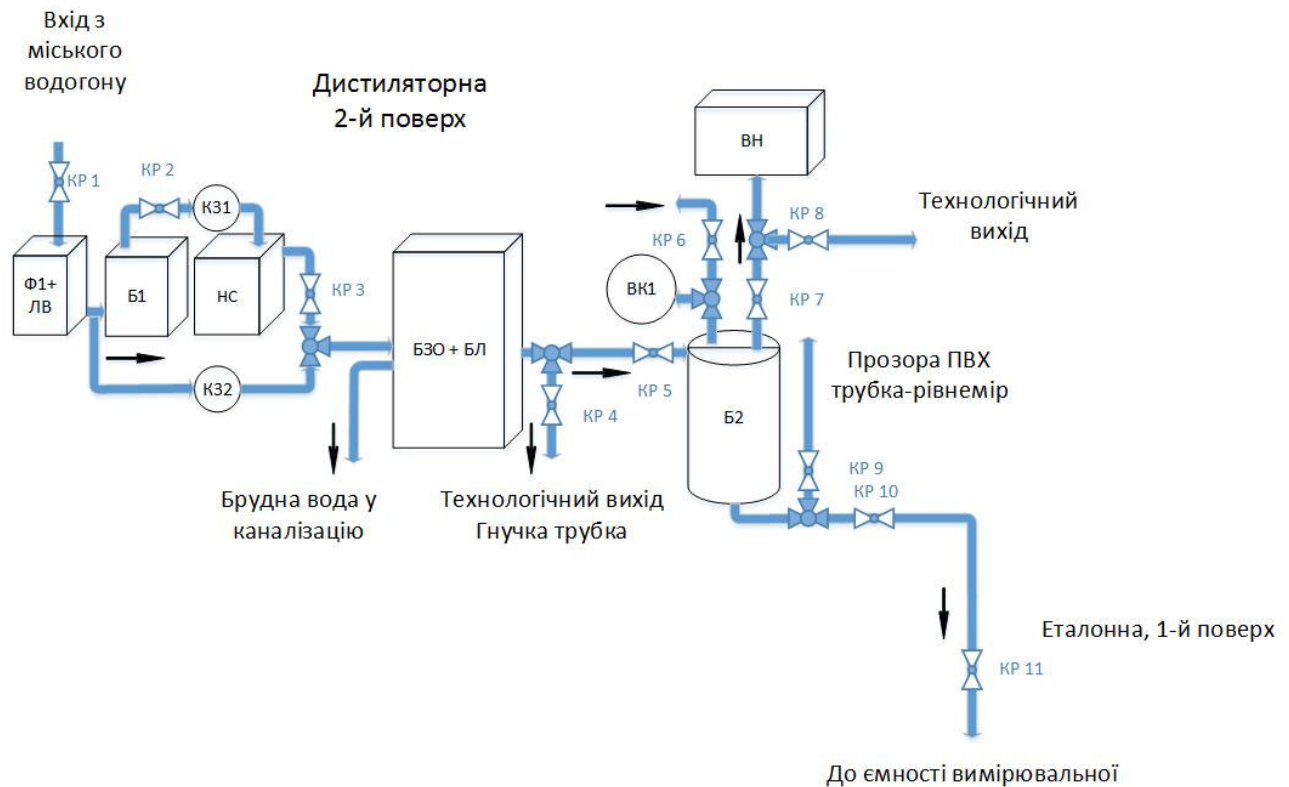
Каретка 2 забезпечує :

- лінійне переміщення вздовж осі X2 від 0 до 16 см;
- лінійне переміщення вздовж осі Y2 від 0 до 50 см;
- обертовий рух навколо осі A2 та B2 від -30 до +30 град.

Система підготування води

Для проведення вимірювань, вимірювальну ємність наповнюють спеціально підготовленою водою, яка повинна мати такі параметри: вміст кисню у воді – не більше ніж 4 мг/л, провідність води – не більше ніж 25 мкСм/см.

Для забезпечення вище наведених параметрів води розроблено систему підготування води, функціональна схема якої подана на рисунку 2.3 [51].



Φ1 – фільтр для холодної води;
ЛВ – водяний лічильник;
Б1 – бак накопичувальний, пластмасовий;
Б2 – бак металевий;
К31, К32 – клапани зворотні;
НС – насосна станція;

БЗО – блок зворотного осмосу;
БЛ – бактерицидна лампа;
ВК1 – вакуумметр;
ВН – вакуумний насос;
КР1 – КР11 – крани запірні.

Рисунок 2.3 – Функціональна схема системи підготування води

Вода з міського водогону через кран КР1 та фільтр Φ1 потрапляє у бак накопичувальний Б1, який автоматично наповнюється до встановленого рівня, а далі на блок зворотного осмосу БЗО. Насосна станція НС забезпечує подачу води з накопичувального баку Б1 у блок зворотного осмосу БЗО у разі відсутності води у міському водогоні. Потім вода проходить через бактерицидну лампу БЛ та кран КР5 у металевий бак Б2, де її піддають вакуумуванню за допомогою вакуумного насосу ВН. Тиск, який створює ВН в Б2 контролюють вакуумметром ВК1. Рівень води у Б2 контролюють візуально за допомогою трубки-рівнеміру. Після проведення вакуумування підготовлену воду подають через крани КР10, КР11 у вимірювальну ємність. Вміст кисню у воді та провідність води контролюють за допомогою киснеміра типу SensION 6 та кондуктометра типу SX813.

Комплект допоміжних УП

Для калібрування гідрофонів застосовують комплект допоміжних УП типу E1025-SU, E2312-SU, E3512-SU та E9906-SU фірми MANA Instruments. Вони дозволяють формувати необхідний рівень ультразвукового тиску у воді на відповідних частотах та забезпечують під час калібрування співвідношення сигнал/шум не менше ніж 20 дБ. Частоту, на якій застосовують УП, та їх геометричний радіус наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Комплект допоміжних УП

Тип УП	Частота, МГц	Геометричний радіус, мм
E1025-SU	1	12,5
E2312-SU	2	6,35
E-3512-SU	3	6,35
	4	6,35
E9906-SU	5	3,0
	6	3,0
	7	3,0
	8	3,0
	9	3,0
	10	3,0

Програмне забезпечення «*Acoustic etalon*» (рисунок 2.4) керує лінійними та кутовими переміщеннями УП та гідрофона для суміщення їх акустичних осей під час вимірювання та встановлення їх на вимірювальній відстані d .

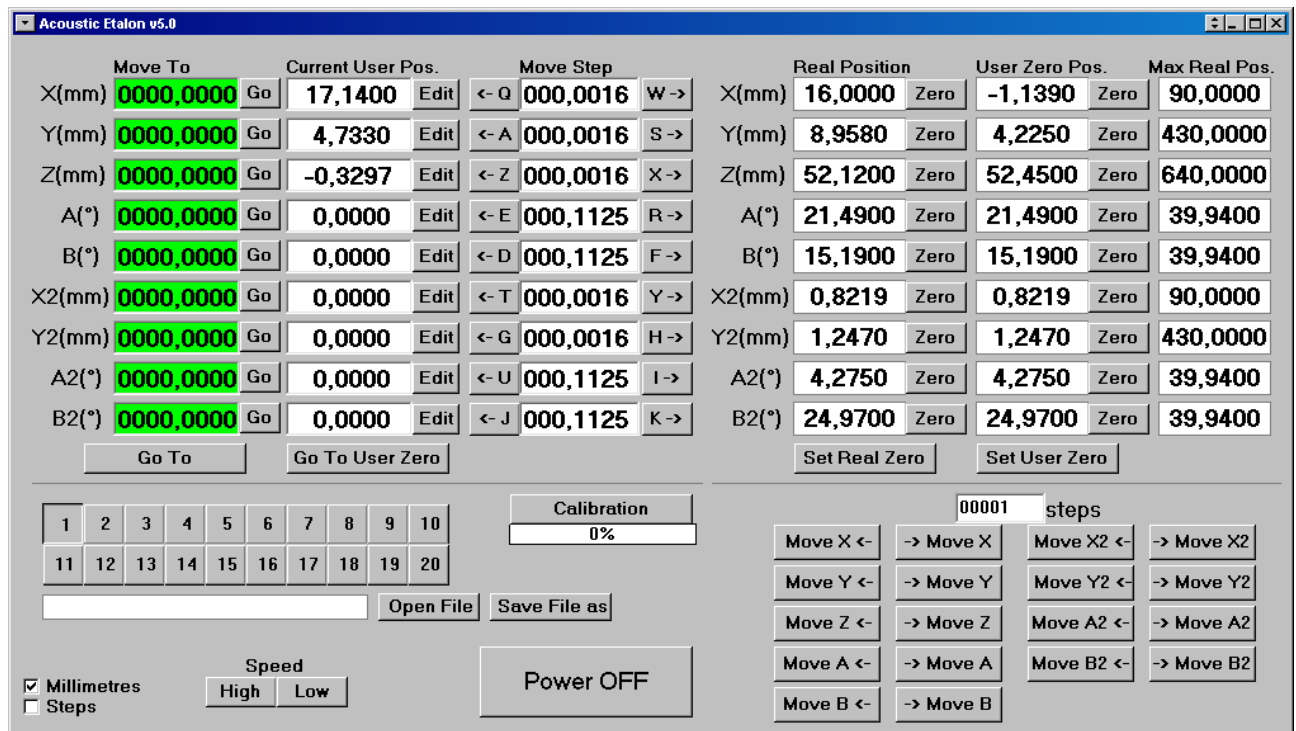


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд діалогового вікна програмного забезпечення «Acoustic etalon»

Для генерування сигналу збудження УП використовують генератор AFG3021 та підсилювач потужності A150, які у парі формують імпульсно-тональний сигнал з синусоїдою у діапазоні від 1 МГц до 10 МГц необхідної амплітуди (рисунок 2.2). Мінімальну кількість періодів синусоїди у імпульсно-тональному сигналі розраховують за формулою [51]:

$$n = \frac{D}{\lambda}, \quad (2.1)$$

де: D – геометричний діаметр допоміжного УП;

λ – довжина звукової хвилі у воді на робочій частоті УП.

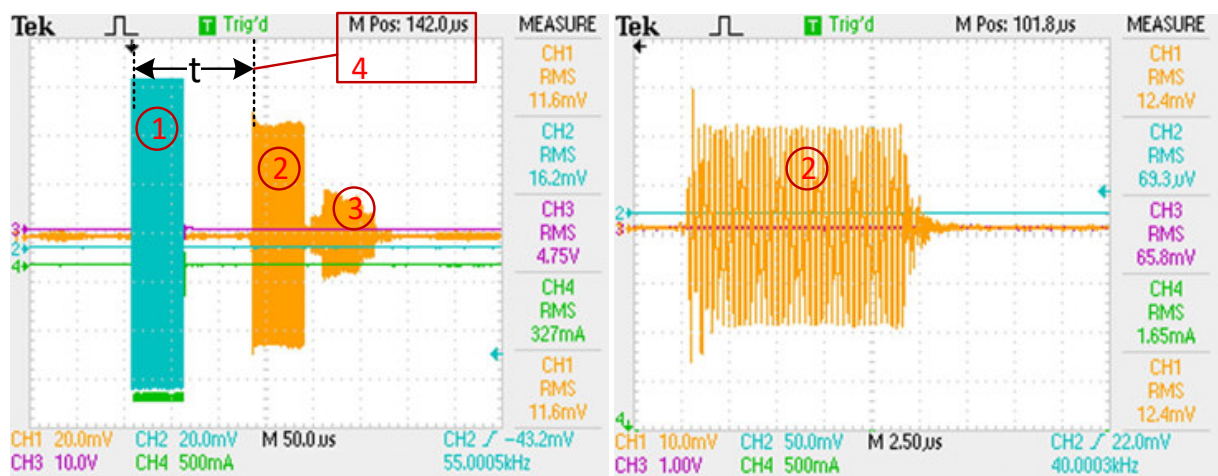
Струм збудження $I_1(f)$ вимірюють струмовим пробником P6022 та осцилографом TDS-2024 (вимірювальний канал 2, рисунок 2.2). Осцилографом TDS-2024 вимірюють напругу $U_1(f)$ (вимірювальний канал 1, рисунок 2.2), створену на УП відбитим від рефлектора акустичним сигналом, та напругу гідрофона $U_2(f)$ (вимірювальний канал 3, рисунок 2.2). Вимірювальний канал 4 (рисунок 2.2) осцилографа використовують для синхронізації вимірювань, а також для вимірювання відстані d між УП і рефлектором та УП і гідрофоном.

Відстань d визначають за допомогою вимірювання часу t між початком генерування сигналу збудження та моментом його отримання на УП чи гідрофоні та розраховують за формулою [40]:

$$d = c \cdot t, \quad (2.2)$$

де c – швидкість звуку у воді, м/с.

Приклад вимірювальних сигналів $I_1(f)$, $U_2(f)$ отриманих за допомогою осцилографа TDS-2024 показано на рисунку 2.5.



1 – Сигнали напруги та струму збудження $I_1(f)$ УП; 2 – сигнал напруги $U_2(f)$ отриманий з гідрофона; 3 – сигнал паразитного відбиття виміряний гідрофоном; 4 – вимірне значення часу t для визначення відстані d

Рисунок 2.5 – Вимірювання напруги, струму та інтервалу часу за допомогою осцилографа TDS-2024

За результатами дослідження еталона НДЕТУ АUV-02-2018 [51] встановлено, що він має такі характеристики:

- робочий діапазон частот від 0,5 МГц до 10 МГц;
- діапазон значень тиску, в якому відтворюється одиниця ультразвукового тиску, становить від 10 кПа до 100 кПа;
- розширена невизначеність U становить 14,12 % (за коефіцієнта охоплення $k = 2$ та довірчої ймовірності $P = 0,95$).

2.2 Математична модель методу взаємності з двома перетворювачами

Передавальну характеристику ультразвукового перетворювача $S_{tr}(f)$ під час випромінювання акустичного сигналу визначають за формулою [46]:

$$S_{tr}(f) = \frac{P_0(f)}{I_1(f)}, \quad (2.3)$$

де: $I_1(f)$ – струм збудження ультразвукового перетворювача, А;

$P_0(f)$ – акустичний тиск створений на поверхні перетворювача, Па.

Передавальну характеристику ультразвукового перетворювача $M_{tr}(f)$ під час приймання акустичного сигналу визначають за формулою [46]:

$$M_{tr}(f) = \frac{U_1(f)}{P_i(f)}, \quad (2.4)$$

де: $U_1(f)$ – напруга, згенерована ультразвуковим перетворювачем під час прийому відбитого від рефлектора акустичного сигналу, В;

$P_i(f)$ – акустичний тиск на поверхні ультразвукового перетворювача, під час прийому акустичного сигналу відбитого від рефлектора, який розміщений на відстані d , Па.

Коефіцієнт взаємності $J_P(f)$ для взаємного ультразвукового перетворювача виражають формулою [47]:

$$J_P(f) = \frac{M_{tr}(f)}{S_{tr}(f)}. \quad (2.5)$$

За визначенням, для плоскої біжучої звукової хвилі, згенерованої УП коефіцієнт взаємності становить [47]:

$$J_P = \frac{2 \cdot A_{ER}}{\rho \cdot c}, \quad (2.6)$$

де: A_{ER} – ефективна площа ультразвукового перетворювача, м²;

ρ – густина вимірювального середовища (води), кг/м³;

c – швидкість звуку у воді, м/с.

Використовуючи формули (2.5) та (2.6) отримаємо рівність, з якої можна визначити тиск $P_0(f)$ на поверхні УП [12]:

$$P_0(f) = \frac{U_1(f)}{P_i(f)} \cdot \frac{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}{2 \cdot A_{ER}}. \quad (2.7)$$

Оскільки, акустичний тиск $P_i(f)$ на поверхні УП, під час прийому відбитого від рефлектора акустичного сигналу, який розміщений на відстані d , залежить від коефіцієнта згасання звукової хвилі у воді, α , коефіцієнта відбивання рефлектора, k , та коефіцієнта дифракційних втрат УП, G_1 , то його виражають формулою [12]:

$$P_i(f) = P_0(f) \cdot k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}. \quad (2.8)$$

Підставивши формулу (2.8) у (2.7) отримаємо тиск $P_0(f)$, для визначення якого потрібно виміряти електричні величини $U_1(f)$ та $I_1(f)$ [12]:

$$P_0(f) = \sqrt{\frac{U_1(f)}{k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}} \cdot \frac{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}{2 \cdot A_{ER}}}. \quad (2.9)$$

Передавальну характеристику гідрофона або чутливість $M_h(f)$ під час приймання акустичного сигналу, визначають згідно з формулою (1.4), додатково враховуючи вплив дифракційних втрат гідрофона [12], G_2 :

$$M_h(f) = \frac{U_2(f)}{P_0(f) \cdot G_2} = \frac{U_2(f)}{G_2} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}}{U_1(f)} \cdot \frac{2 \cdot A_{ER}}{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}}. \quad (2.10)$$

Відповідно до функціональної схеми еталона (рисунок 2.2), під час вимірювання напруги $U_1(f)$, що створена відбитим від рефлектора акустичним сигналом, електричне коло підсилювач потужності-УП не розривається. Під час прийому сигналу відбувається шунтування внутрішнього імпедансу УП вихідним каскадом підсилювача потужності, яке корегують за допомогою коефіцієнта шунтування $K_R(f)$, який визначають як [12]:

$$K_R(f) = \frac{I_{sc}(f)}{I_1(f)}, \quad (2.11)$$

де: $I_{sc}(f)$ - струм короткого замикання, А, який вимірюють від'єднавши УП від підсилювача потужності та замінивши його на BNC закоротку.

Враховуючи (2.10) та (2.11), передавальну характеристику гідрофона $M_h(f)$, визначають за формулою [12]:

$$M_h(f) = \frac{U_2(f)}{G_2} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}}{U_1(f) \cdot K_R(f)} \cdot \frac{2 \cdot A_{ER}}{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}}. \quad (2.12)$$

2.3 Аналіз джерел невизначеності еталона

Для підвищення точності калібрування гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 необхідно провести аналіз джерел невизначеності передавальної характеристики гідрофона $M_h(f)$. Для проведення аналізу впливу вхідних величин передавальної характеристики гідрофона $M_h(f)$ (2.12) згідно з ДСТУ-Н РМГ 43:2006 необхідно [52]:

- визначити номінальні значення та характеристики точності вхідних величин x_i ;
- обчислити коефіцієнти чутливості c_i , які розраховують як часткові похідні функції $M_h(f)$ за формулою [52]:

$$c_i = \frac{\partial M_h}{\partial x_i}, \quad (2.13)$$

де ∂x_i – часткова похідна по вхідній величині x_i ;

- визначити закони розподілу та обчислити стандартні невизначеності вхідних величин $u(x_i)$;
- обчислити внесок $u_i(M_h)$ кожної вхідної величини у сумарну стандартну невизначеність згідно з формулою [52]:

$$u_i(M_h) = c_i \cdot u(x_i), \quad (2.14)$$

де: $u(x_i)$ – стандартна невизначеність i -ої вхідної величини;

c_i – коефіцієнт чутливості i -ої вхідної величини.

- скласти бюджет невизначеності для передавальної характеристики гідрофона (2.12).

Згідно з (2.13) коефіцієнт чутливості c_{U_2} для вхідної величини $U_2(f)$ становитиме:

$$c_{U_2} = \frac{\partial M_h}{\partial U_2} = 1. \quad (2.15)$$

Коефіцієнти чутливості c_i для інших вхідних величин x_i передавальної характеристики гідрофона (2.12) розраховують аналогічно до (2.13).

Згідно з (2.12), на точність визначення передавальної характеристики гідрофона $M_h(f)$ впливають такі величини:

- струм збудження УП $I_1(f)$;
- змінна напруга на виході УП $U_1(f)$;
- напруга на виході гідрофона $U_2(f)$;
- коефіцієнт шунтування $K_R(f)$;
- ефективна площа допоміжного УП, A_{ER} ;
- швидкість звуку у воді, c ;
- густина чистої (дистильованої) води, ρ ;
- коефіцієнт відбивання рефлектора k ;
- коефіцієнт загасання звуку у воді α ;
- вимірювальна відстань d ;
- коефіцієнт дифракційних втрат УП G_1 ;
- коефіцієнт дифракційних втрат гідрофона G_2 ;

кожна з яких вносить свій вклад у сумарну невизначеність.

Струм збудження УП $I_1(f)$ вимірюють за допомогою струмового пробника типу Р6022 фірми Tektronix. Це пристрій, що підключають до входу осцилографа, який вимірює сигнал змінного струму без розриву вимірювального кола. Основні технічні характеристики струмового пробника типу Р6022 [53] подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики струмового пробника типу P6022

Назва характеристики	Діапазон
Діапазон частот	від 935 Гц до 120 МГц
Діапазон вимірювання струму	від 1 мА до 4 А (RMS)
Чутливість	1 мА/мВ або 10 мА/мВ
Точність вимірювання	$\pm 3\%$
Спосіб підключення	до 1 МОм входу осцилографа

Згідно з даними виробника щодо точності P6022 (таблиця 2.2), стандартну невизначеність за типом В вимірювання струму збудження УП за прямокутного закону розподілу оцінюють як: $u_B(I_1) = \frac{3,0\%}{\sqrt{3}} = 1,73\%$.

Для вимірювання змінної напруги на виході УП $U_1(f)$ та напруги на виході гідрофона $U_2(f)$ в імпульсному режимі використовують 4 каналний цифровий осцилограф фірми Tektronix, типу TDS2024C. Осцилограф TDS2024C вимірює сигнали частотою до 200 МГц з максимальною частотою дискретизації 2 Гвиб/с, що дозволяє дискретизувати вхідний сигнал в режимі реального часу з 10-ти кратною або більше передискретизацією на усіх вимірювальних каналах. При цьому продуктивність вибірки не зменшується під час використання декількох вимірювальних каналів осцилографа. Основні технічні характеристики осцилографа TDS2024C [54] подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики осцилографа TDS2024C

Назва характеристики	Діапазон
Діапазон частот	200 МГц
Кількість вимірювальних каналів	4
Чутливість (амплітуда)	від 2 мВ/под. до 5 В/под.
Точність вимірювання змінної напруги	$\pm 3\%$
Максимальна вхідна напруга	300 В rms
Вхідний імпеданс	1 МОм (20 пФ)
Точність вимірювання часу	0,005 %

Згідно з даними виробника на осцилограф (таблиця 2.3), стандартну невизначеність за типом В вимірювання змінної напруги $U_1(f)$ та $U_2(f)$ за прямокутного закону розподілу оцінюють як: $u_B(U_1) = u_B(U_2) = \frac{3,0\%}{\sqrt{3}} = 1,73$.

Коефіцієнт шунтування $K_R(f)$, визначають шляхом розрахунку відповідно до (2.11), додатково вимірюючи струм короткого замикання, $I_{sc}(f)$, за допомогою струмового пробника P6022. Тому стандартну невизначеність за типом В вимірювання струму короткого замикання за прямокутного закону розподілу оцінюють як: $u_B(I_{sc}) = \frac{3,0\%}{\sqrt{3}} = 1,73\%$.

Ефективна площа допоміжного УП, A_{ER} , яку часто називають ефективною площею випромінювання, є одним із важливих параметрів в ультразвукових вимірюваннях. Вона визначає, наскільки ефективно УП може перетворювати електричну енергію в акустичну і навпаки. Допоміжний УП, який застосовують під час відтворення ультразвукового тиску, повинен мати плоску круглу активну поверхню і створювати акустичне поле, яке за властивостями дуже близьке до поля плоского поршневого джерела. УП повинен бути пасивним, оберненим та взаємним [47]. Комплект допоміжних УП, наведений у таблиці 2.1, відповідає цим вимогам. Виробник УП у технічній документації не зазначає ефективну площу УП, а тільки геометричний радіус, з якого можливо визначити геометричну площу УП. На практиці, ефективна площа УП може суттєво відрізнятись від геометричної, через спосіб монтажу та демпфування чутливого елементу УП. Як видно із формули (2.12), ефективна площа УП впливає на точність визначення передавальної характеристики гідрофона, тому її необхідно окремо досліджувати.

Для попередньої оцінки стандартної невизначеності ефективної площі УП, можна скористатись даними виробника щодо точності визначення геометричного радіусу УП [55], яка становить $\pm 0,5$ мм. У випадку розрахунку геометричної площі, наприклад, для УП типу E1025-SU, границя похибки буде рівною 7,84%. Тому стандартну невизначеність за типом В ефективної площі УП за прямокутного закону розподілу оцінюють як: $u_B(A_{ER}) = \frac{7,84\%}{\sqrt{3}} = 4,53\%$.

Швидкість звуку у воді c [м/с] залежить від температури, а розрахувати її можна за допомогою полінома, запропонованого Дель Гроссом та Мадером, який застосовують у діапазоні температур від 0 до 100°C [56]:

$$c = 1402,38689 + 5,03686088 \cdot t - 5,80858499 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 + 3,3481714 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 1,49252527 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 + 3,23913472 \cdot 10^{-9} \cdot t^5. \quad (2.16)$$

Розраховані значення швидкості звуку у чистій воді у діапазоні температури води від 17°C до 25°C з кроком 0,2°C наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Швидкість звуку у чистій воді

Температура води, °C	Швидкість звуку, м/с	Температура води, °C	Швидкість звуку м/с
17,00	1472,769	21,20	1486,280
17,20	1473,101	21,40	1486,576
17,40	1473,432	21,60	1486,871
17,60	1473,762	21,80	1487,166
17,80	1474,091	22,00	1488,335
18,00	1476,050	22,20	1489,204
18,20	1477,018	22,40	1489,492
18,40	1477,339	22,60	1489,779
18,60	1477,659	22,80	1490,065
18,80	1477,978	23,00	1491,203
19,00	1479,246	23,20	1492,048
19,20	1479,561	23,40	1492,328
19,40	1479,875	23,60	1492,607
19,60	1480,188	23,80	1492,886
19,80	1480,501	24,00	1493,992
20,00	1482,358	24,20	1495,086
20,20	1483,275	24,40	1495,358
20,40	1483,579	24,60	1495,628
20,60	1483,883	24,80	1495,898
20,80	1484,185	25,00	1496,704
21,00	1485,387		

Стандартну невизначеність за типом В визначення швидкості звуку у воді можна оцінити на основі даних із таблиці 2.4 та вимірної температури води. Наприклад, для температури води 18,0°C вимірної термометром типу CheckTemp 2 фірми Hanna, точність якого становить 0,2°C, стандартну

невизначеність типу В швидкості звуку у воді за прямокутного закону розподілу оцінюють як:

$$u_B(c) = \frac{100 \cdot (c(T) - c(T + \Delta))}{\sqrt{3} \cdot c(T)} = \frac{100 \cdot (1476,05 - 1474,091)}{\sqrt{3} \cdot 1474,091} = \frac{0,1\%}{\sqrt{3}} = 0,06\%.$$

Густина чистої (дистильованої) води, ρ , кг/м³ - залежить від температури і може бути розрахована за допомогою полінома п'ятого порядку, який застосовують для діапазону температури води від 5 до 40°C [57].

$$\rho = 999,85308 + 6,32693 \cdot 10^{-2} \cdot t - 8,523829 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 6,943248 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 3,821216 \cdot 10^{-7} \cdot t^4. \quad (2.17)$$

Розраховані значення густини води (чистої) у діапазоні температури від 17°C до 25°C з кроком 0,2°C наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Густина чистої води

Температура води, °C	Густина води, кг/м ³	Температура води, °C	Густина води, кг/м ³
17,00	998,7745	21,20	997,9478
17,20	998,7395	21,40	997,9038
17,40	998,7040	21,60	997,8594
17,60	998,6681	21,80	997,8145
17,80	998,6318	22,00	997,7693
18,00	998,595	22,20	997,7236
18,20	998,5578	22,40	997,6776
18,40	998,5201	22,60	997,6311
18,60	998,4820	22,80	997,5843
18,80	998,4435	23,00	997,5370
19,00	998,4045	23,20	997,4894
19,20	998,3651	23,40	997,4413
19,40	998,3253	23,60	997,3929
19,60	998,2850	23,80	997,3441
19,80	998,2444	24,00	997,2949
20,00	998,2033	24,20	997,2453
20,20	998,1617	24,40	997,1953
20,40	998,1198	24,60	997,1449
20,60	998,0774	24,80	997,0942
20,80	998,0346	25,00	997,043
21,00	997,9914		

Стандартну невизначеність за типом В визначення густини води можна оцінити на основі даних із таблиці 2.5 та вимірної температури води.

Наприклад, для температури води 18,0°C виміряної термометром типу CheckTemp 2 фірми Hanna, точність якого становить 0,2°C, стандартну невизначеність типу В густини води за прямокутного закону розподілу оцінюють як:

$$u_B(\rho) = \frac{100 \cdot (\rho(T) - \rho(T+\Delta))}{\sqrt{3} \cdot \rho(T)} = \frac{100 \cdot (998,6318 - 998,595)}{\sqrt{3} \cdot 998,595} = \frac{0,004\%}{\sqrt{3}} = 0,002\%.$$

Рефлектор, який застосовують на етапі калібрування УП методом самовзаємності, виготовлений із нержавіючої сталі, тому коефіцієнт відбивання k на границі вода-нержавіюча сталь визначають як [58]:

$$k = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = 0,9370, \quad (2.18)$$

де: ρ_2 – густина нержавіючої сталі;

c_2 – швидкість звуку в нержавіючій сталі;

ρ_1 – густина води;

c_1 – швидкість звуку води.

Значення параметрів середовищ, які застосовані для розрахунку коефіцієнта відбивання k наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Параметри середовищ, для розрахунку коефіцієнта відбивання k

Середовище	Густина, кг/м ³	Швидкість звуку, м/с
Нержавіюча сталь	7910	5790
Чиста вода	998	1492

Стандартну невизначеність за типом В визначення коефіцієнта відбивання k за прямокутного закону розподілу оцінюють як:

$$u_B(k) = \frac{2 \cdot \sqrt{u_B(\rho)^2 + u_B(c)^2}}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,1^2 + 0,004^2}}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,12\% .$$

Коефіцієнт загасання звуку у воді α , $\text{Гц}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$, залежить від температури і частоти, а визначають його за допомогою полінома, який застосовують для діапазону температур від 0°C до 60°C [40]:

$$\alpha = f^2 \cdot (5,68524 \cdot 10 - 3,02545 \cdot 10T + 1,17416 \cdot 10^{-1}T^2 - 2,95430 \cdot 10^{-3}T^3 + 3,96985 \cdot 10^{-5}T^4 - 2,11091 \cdot 10^{-7}T^5) \cdot 10^{-15}, \quad (2.19)$$

де: f – частота, Гц;

T – температура води, $^\circ\text{C}$.

Наприклад, для температури води $18,0^\circ\text{C}$, вимірної термометром типу CheckTemp 2 фірми Hanna, точність якого становить $0,2^\circ\text{C}$, та частоти $1,0 \text{ МГц}$ стандартну невизначеність типу В коефіцієнта згасання за прямокутного закону розподілу оцінюють як:

$$u_B(\alpha) = \frac{100 \cdot (\alpha(T) - \alpha(T + \Delta))}{\sqrt{3} \cdot \alpha(T)} = \frac{100 \cdot (0,02698 - 0,02681)}{\sqrt{3} \cdot 0,02698} = \frac{0,63\%}{\sqrt{3}} = 0,37\%.$$

Вимірювальна відстань d – це шлях, що проходить ультразвук від ультразвукового перетворювача до рефлектора і назад на етапі калібрування УП методом самовзаємності (перший етап), та від УП до гідрофона під час калібрування гідрофона (другий етап). Вимірювальна відстань d повинна бути достатньою для уникнення впливу ближнього поля, яке має складну структуру. Тому, гідрофон та УП потрібно калібрувати у вільному звуковому полі, де вплив відбитих сигналів нехтовно малий. З іншої сторони, вимірювальну відстань d треба обрати такою, щоб під час калібрування гідрофона чи УП для усіх електричних вимірювань співвідношення корисний сигнал/шум було не менше ніж 20 дБ.

Стандартна невизначеність вимірюваної відстані d складається з двох основних складових:

1. невизначеності розрахунку відстані d згідно з (1.12);

2. невизначеності вимірювання часу t , оскільки відстань d визначають за допомогою вимірювання часу t осцилографом між початком генерації сигналу збудження та його отримання на УП або гідрофоні (див. рисунок 2.5).

Згідно з даними виробника на осцилограф (таблиця 2.3), стандартну невизначеність за типом В вимірювання часу t за прямокутного закону розподілу оцінюють як: $u_B(t_{osc}) = \frac{0,005\%}{\sqrt{3}} = 0.003\%$.

Вимірювальна відстань d є важливим параметром для визначення передавальної характеристики гідрофона $M_h(f)$, і може становити від 1 до 3 протяжностей ближнього поля N та залежить від конкретного допоміжного перетворювача, що використовують [40]. Тобто,

$$1N < d < 3N. \quad (2.20)$$

Згідно з формулою (1.12), протяжність ближнього поля залежить від частоти випромінюваного ультразвукового сигналу та ефективного радіуса допоміжного УП. За визначенням [40], ефективний радіус нефокусуючого УП – це радіус еквівалентного поршнеподібного джерела, для якого просторовий розподіл амплітуди ультразвукового тиску в дальньому полі дуже наближений до розподілу амплітуди ультразвукового тиску самого перетворювача. Виробник УП у технічній специфікації не наводить значення ефективного радіуса, а вказує лише геометричний. Згідно з [40], у випадку відсутності ефективного радіуса УП рекомендовано використовувати його геометричний радіус. Якщо проаналізувати вплив ефективного радіуса a_{tr} на протяжність ближнього поля N відповідно до [52], використовуючи формулу (1.12), тобто взяти часткову похідну ∂N по вхідному параметру ∂a_{tr} , то отримаємо коефіцієнт впливу 2, а це у випадку відмінності ефективного радіуса УП від геометричного, наприклад, на 5%, дасть зміну відстані N на 10%.

Для попередньої оцінки стандартної невизначеності вимірювальної відстані d , можна скористатись даними виробника щодо точності визначення геометричного радіусу УП, яка становить $\pm 0,5$ мм. Наприклад, для УП типу E1025-SU, границя похибки геометричного радіусу буде рівною 4,0%. Таким

чином, згідно з (1.12) та враховуючи невизначеність вимірювання часу осцилографом, стандартну невизначеність вимірювальної відстані d за типом В за прямокутного закону розподілу оцінюють як:

$$u_B(d) = \frac{\sqrt{(u_B(f))^2 + (2 \cdot u_B(a_{tr}))^2 + (u_B(c))^2 + (u_B(t_{osc}))^2}}{\sqrt{3}} =$$

$$= \frac{\sqrt{(0.01\%)^2 + (2 \cdot 4.0\%)^2 + (0.01\%)^2 + (0.005\%)^2}}{\sqrt{3}} = \frac{8.0\%}{\sqrt{3}} = 4.62\% . \quad (2.21)$$

Коефіцієнт дифракційних втрат G_1 – це поправка, яку застосовують до виміряного значення напруги $U_1(f)$ у формулі (2.12), для врахування зміни профіля акустичної хвилі на відстані d , під час випромінювання та приймання акустичного сигналу ультразвуковим перетворювачем, на етапі калібрування УП методом самовзаємності (перший етап) [51, 63].

Коефіцієнт дифракційних втрат G_2 – це поправка, яку застосовують до виміряного значення напруги $U_2(f)$ у формулі (2.12) для врахування зміни профіля акустичної хвилі на відстані d під час приймання акустичного сигналу гідрофоном (другий етап) [51, 63].

Через неідеальність плоско-поршневого джерела ультразвукового тиску (УП), ці поправки враховують зміну (відношення) акустичного тиску, усередненого по поверхні приймача (УП або гідрофона) P_d на відстані d , відносно значення тиску P_0 (для плоскої хвилі) безпосередньо на поверхні випромінювача (за відсутності інтерференції) і залежать від довжини акустичного шляху (d) та радіусів приймача і випромінювача. Методи розрахунку коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 , G_2 подано у публікаціях [61] та [62]. Для попередньої оцінки стандартної невизначеності коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 , G_2 , можна скористатись результатами проведених міжнародних ключових звірень ССАUV.U-K4 [63], в яких національні метрологічні інститути застосовували метод взаємності з двома перетворювачами для калібрування гідрофонів: стандартну невизначеність

коефіцієнта G_1 оцінюють в межах від 0,6 % до 2,5 %, а коефіцієнта G_2 з врахуванням ефекту просторового усереднення гідрофона – від 1,2 % до 4 %.

Стандартна невизначеність за типом А передавальної характеристики гідрофона $M_h(f)$ відображає випадкові похибки вимірювань і визначається шляхом статистичного аналізу серії результатів, враховуючи їх розсіювання, стабільність умов експерименту та кількість проведених вимірювань.

Стандартну невизначеність за типом А обчислюють як [52]:

$$u_A = \frac{s(M_h)}{\sqrt{n}}, \quad (2.22)$$

де $s(M_h)$ — стандартний відхил результатів вимірювань передавальної характеристики гідрофона $M_h(f)$;

n — кількість вимірювань.

Стандартна невизначеність за типом А передавальної характеристики гідрофона $M_h(f)$ становить 5,3%, і може змінюватись залежно від частоти сигналу вимірювання та типу каліброваного гідрофона [51].

У таблиці 2.7 наведено бюджет невизначеності передавальної характеристики гідрофона, усі вхідні величини та їх внески у сумарну невизначеність.

Таблиця 2.7 – Бюджет невизначеності передавальної характеристики гідрофона

№	Вхідна величина	Границі похибки вхідної величини, %	Закон розподілу вхідної величини	Стандартна невизначеність, $u(x_i)$, %	Коефіцієнт чутливості, c_i	Внесок, $u_i(M_h)$, %
1	Струм УП $I_l(f)$	3,0	прямокутний	1,73	0,5	0,87
2	Напруга на виході УП $U_1(f)$	3,0	прямокутний	1,73	0,5	0,87
3	Напруга на виході гідрофона $U_2(f)$	3,0	прямокутний	1,73	1	1,73
4	Коефіцієнт шунтування $K_R(f)$	3,0	прямокутний	1,73	0,5	0,87
5	Ефективна площа УП, A_{ER}	7,84	прямокутний	4,53	0,5	2,27
6	Густина води, ρ	0,004	прямокутний	0,002	0,5	0,001
7	Швидкість звуку у воді, c	0,1	прямокутний	0,06	0,5	0,03
8	Коефіцієнт відбивання k	0,2	прямокутний	0,12	0,5	0,06
9	Поправка G_1	2,5	прямокутний	1,44	0,5	0,72
10	Поправка G_2	4,0	прямокутний	2,31	1	2,31
11	Коефіцієнт згасання $e^{-\alpha}$	0,63	прямокутний	0,37	0,5	0,19
12	Вимірювальна відстань e^d	8,0	нормальний	4,62	0,5	2,31
Сумарна невизначеність за типом В, $u_B(M_h)$, %						4,65
Сумарна невизначеність за типом А, $u_A(M_h)$, %						5,31
Сумарна стандартна невизначеність, $u_C(M_h)$, %						7,06
Розширена невизначеність (за коефіцієнта розширення $k=2$, $P=0,95$), U , %						14,12

2.4 Висновок до розділу

За результатами аналізу джерел невизначеності, що впливають на точність визначення передавальної характеристики гідрофона, виявлено 12 вхідних параметрів, кожен із яких вносить вклад у сумарну стандартну невизначеність у методі. Найбільший внесок у загальну невизначеність вносять такі параметри, як ефективна площа ультразвукового перетворювача (УП), коефіцієнти дифракційних втрат G_1 , G_2 , а також вимірювальна відстань d . Ці величини характеризуються високим рівнем похибок, що потребує ретельного аналізу під час їх оцінювання. Точність електричних вимірювань у методі (напруга, струм)

має обмеження, які зумовлені технічними та метрологічними характеристиками вимірювальних засобів. На сьогодні, осцилографи, мультиметри, і інші вимірювальні пристрої мають границі точності, визначені їх конструктивними особливостями та параметрами, такими як розрядність АЦП, частота дискретизації, шумові характеристики тощо. Наприклад, осцилографи в діапазоні частот від 1 кГц до 20 МГц мають похибку вимірювань середньоквадратичного значення напруги у межах $\pm 3\%$ [54], що є суттєвим чинником у точності вимірювань, який неможливо зменшити чи усунути.

Ефективна площа УП є одним із найкритичніших чинників, оскільки її стандартна невизначеність становить 4,53%, що є результатом складності визначення цього параметра. Відсутність даних виробника про ефективну площу УП та її відмінність від геометричної площі, спричинена конструктивними особливостями та демпфуванням, суттєво впливає на точність калібрування гідрофона. Коефіцієнти дифракційних втрат G_1 та G_2 також мають великий вплив на результати вимірювань, зі стандартними невизначеностями 1,44% та 2,31%, відповідно. Ці складові невизначеності вимагають подальшого детального аналізу для зменшення їх внеску у сумарну невизначеність передавальної характеристики гідрофона.

Важливим чинником також є вимірювальна відстань (d), яка залежить від частоти випромінюваного сигналу та ефективного радіуса УП. Встановлено, що похибка визначення вимірювальної відстані може досягати 8,0%, що робить цей параметр критичним для забезпечення точності визначення передавальної характеристики гідрофона. Тому, точне вимірювання ефективного радіуса УП є необхідним для визначення правильної вимірювальної відстані, яка має знаходитись у межах від $1N$ до $3N$ протяжності ближнього поля.

Таким чином, найбільші джерела невизначеності передавальної характеристики гідрофона пов'язані з визначенням ефективної площі УП, коефіцієнтами дифракційних втрат та вимірювальною відстанню (ефективним радіусом УП). Тому, дослідження та визначення цих параметрів є необхідними для зменшення їхнього внеску в сумарну невизначеність вимірювання передавальної характеристики гідрофона.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1 Дослідження ефективної площі допоміжного ультразвукового перетворювача

Ефективна площа випромінювання допоміжного УП – це площа поверхні УП, яка охоплює 100 % створеного ним сумарного середньоквадратичного акустичного тиску. Ефективну площу визначають за формулою [6]:

$$A_{ER} = A_{BCS}(0.3) \cdot F_{ac} , \quad (3.1)$$

де: $A_{BCS}(0.3)$ – мінімальна площа у площині на відстані 0,3 см від передньої поверхні УП, що перпендикулярна до осі поширення променю, для якої сума середньоквадратичного акустичного тиску становить 75% від сумарного середньоквадратичного акустичного тиску;

$F_{ac} = 1,333$ – безрозмірний коефіцієнт.

Точність визначення ефективної площі випромінювання УП (A_{ER}) впливає на точність відтвореного тиску, оскільки вона напряму входить в математичну модель ультразвукового тиску, а невизначеність A_{ER} є однією зі складових загальної невизначеності відтворення ультразвукового тиску, що має найбільший внесок, як було показано у розділі 2.

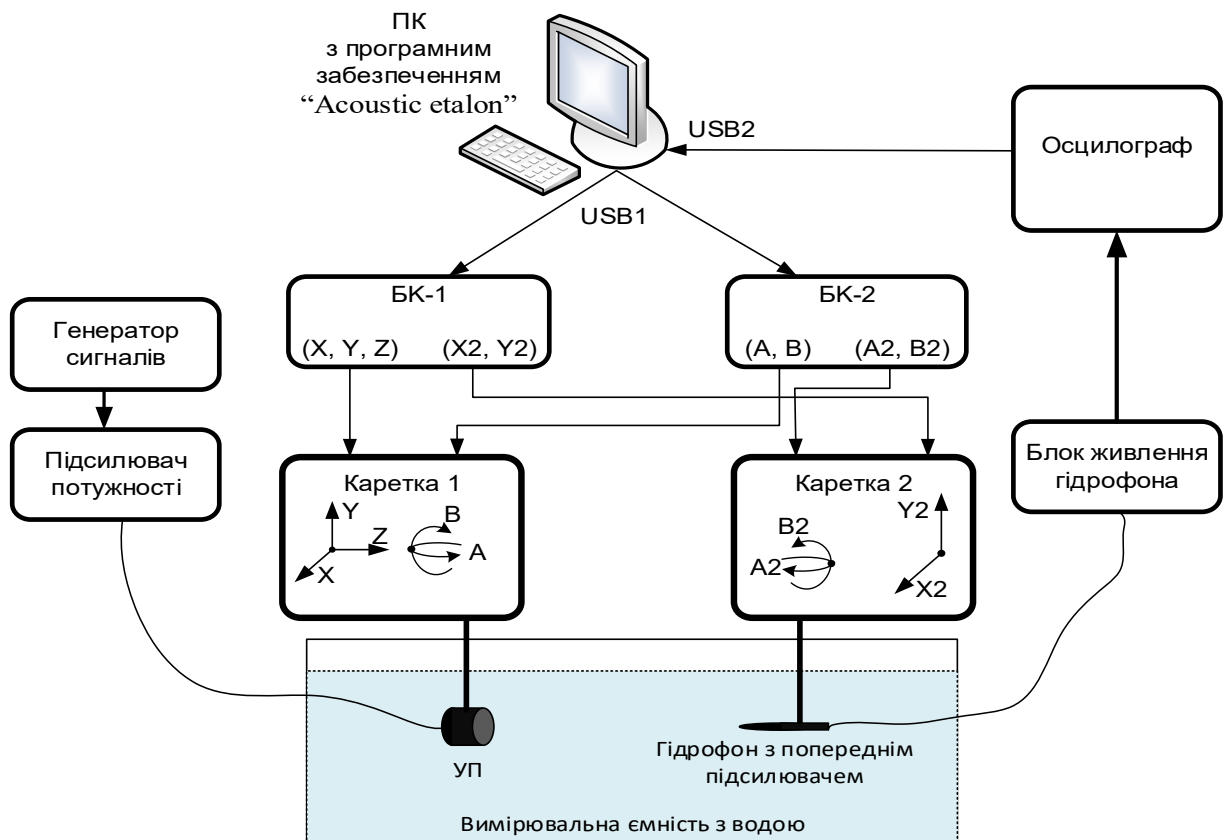
Система растрового сканування ультразвукового поля

Для визначення ефективної площі випромінювання УП створено систему растрового сканування ультразвукового поля УП, яка складається з:

- координатного поворотного пристрою позиціонування гідрофонів (КПППГ), який є складовою еталона НДЕТУ AUV-02-2018;
- вимірювального обладнання: генератора сигналів, підсилювача потужності, осцилографа, гідрофона;

- вимірювальної ємності з водою 985 мм*385 мм*490 мм (об'єм 150 л), розмір якої є достатній для проведення акустичних вимірювань характеристик УП у діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц;
- персонального комп'ютера з програмним забезпеченням «*Acoustic etalon*».

Функціональна схема системи растрового сканування зображена на рисунку 3.1.



БК-1 – блок керування лінійним переміщенням вздовж осей X, Y, Z, X_2, Y_2 ;

БК-2 – блок керування кутовим переміщенням осей A, B, A_2, B_2 ;

ПК – персональний комп'ютер;

УП – ультразвуковий перетворювач.

Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи растрового сканування

КПППГ призначений для просторового позиціонування (розміщення і взаємного орієнтування) у вимірювальній ємності гідрофона і УП, складається з двох кареток з поворотними штангами, на які монтують УП та гідрофон.

Розроблене додаткове програмне забезпечення для растрового сканування, яке є складовою основного програмного забезпечення «*Acoustic etalon*». Воно

дозволяє користувачу задати крок сканування (*step*), загальну кількість точок сканування гідрофоном (для осей X2, Y2), а також часову затримку (*delay*) для уникнення збурень у воді від переміщення гідрофона та коректного вимірювання напруги у кожній точці сканування. Програмне забезпечення автоматично виконує сканування ультразвукового поля УП шляхом переміщення голкового гідрофона відносно УП, позиція якого протягом сканування є незмінною, а також проводить реєстрацію значень напруги на виході гідрофона у кожній точці сканування, виводить результати на екран користувача та зберігає їх у окремому файлі після завершення сканування. Загальний вигляд програмного забезпечення для растрового сканування «*Acoustic etalon*» подано на рисунку 3.2.

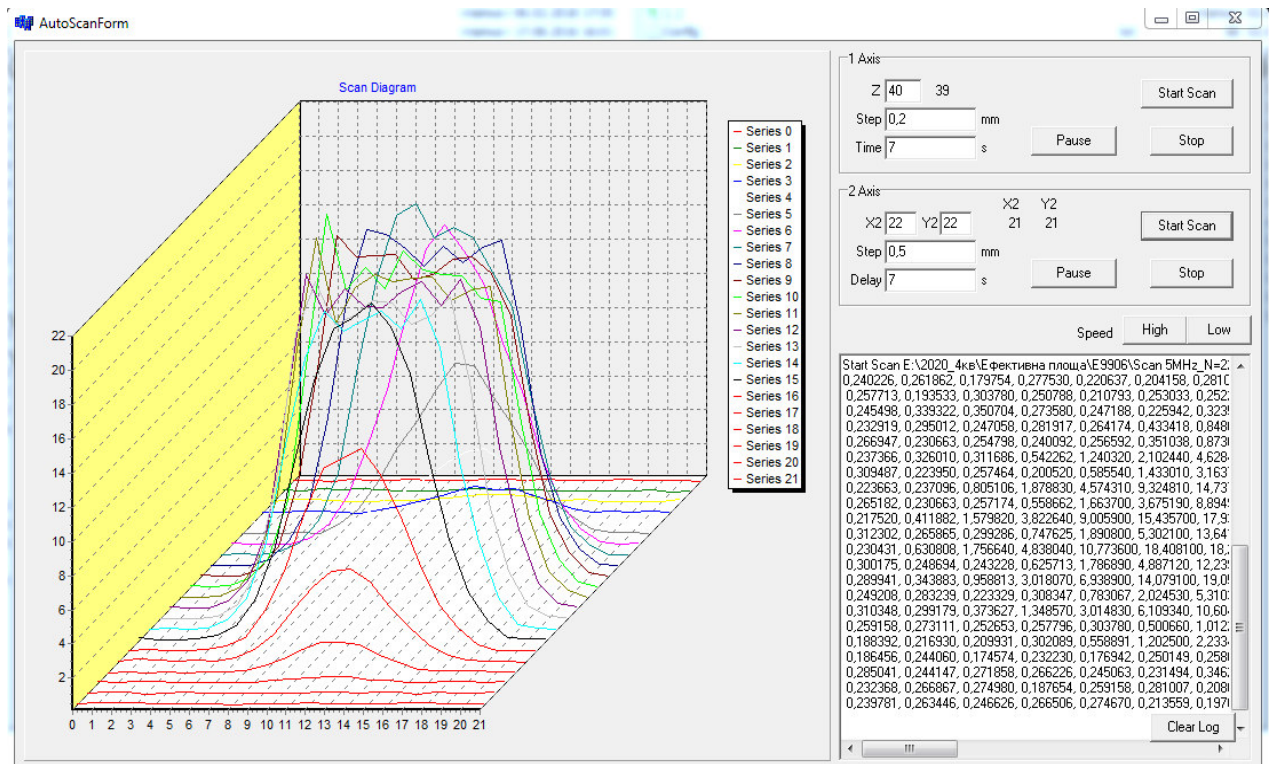


Рисунок 3.2 – Програмне забезпечення «*Acoustic etalon*» для растрового сканування

3.1.1 Визначення ефективної площі випромінювання A_{ER} УП

Дослідження ефективної площі випромінювання УП (A_{ER}) проведено відповідно до [6], методом растрового сканування за допомогою голкового

гідрофона, ефективний радіус якого не має перевищувати 0,4 довжини хвилі на частоті вимірювання. Сканування проведено у площині, перпендикулярній до осі поширення променя, на відстані 0,3 см від передньої поверхні УП. Початковою точкою сканування обрано геометричний центр УП, припускаючи, що вісь поширення ультразвукового променя співпадає з його геометричним центром. Крок сканування та кількість точок сканування по осях X2, Y2 обрано так, щоб лінійне переміщення гідрофона було більшим за геометричний діаметр УП, та охоплювало усю геометричну площу УП. Для достовірного визначення площі поперечного перерізу променю $A_{\text{BCS}}(0.3)$ кількість точок сканування n повинна становити не менше ніж 100.

За допомогою генератора AFG 3021C та підсилювача потужності A150 на УП подавали тонально-імпульсний синусоїдальний сигнал робочої частоти (тривалість 20–30 циклів), а осцилографом TDS 2024C у кожній точці сканування вимірювали напругу на виході гідрофона.

Для визначення площі поперечного перерізу променю, $A_{\text{BCS}}(0.3)$, проведено сортування отриманих напруг у порядку спадання, щоб знайти значення кількості напруг N , яке задовольняє наступне співвідношення [6]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{U_i^2}{M_L^2} \leq 0,75 \sum_{i=1}^N \frac{U_i^2}{M_L^2} < \sum_{i=1}^{n+1} \frac{U_i^2}{M_L^2}, \quad (3.2)$$

де: M_L – чутливість гідрофона, В/Па;

U_i – напруга на виході гідрофона в точці сканування i , В;

n – кількість точок сканування.

Потім визначено значення площі поперечного перерізу променю $A_{\text{BCS}}(0.3)$ за формулою [6]:

$$A_{\text{BSC}}(0.3) = s^2 \cdot N, \quad (3.3)$$

де: s – крок растрового сканування, мм;

N – кількість значень напруг, отриманих після сортування, які задовольняють вимогу (3.2).

Отже, ефективну площу випромінювання УП, A_{ER} , згідно з (3.1) та (3.3) визначено як [6]:

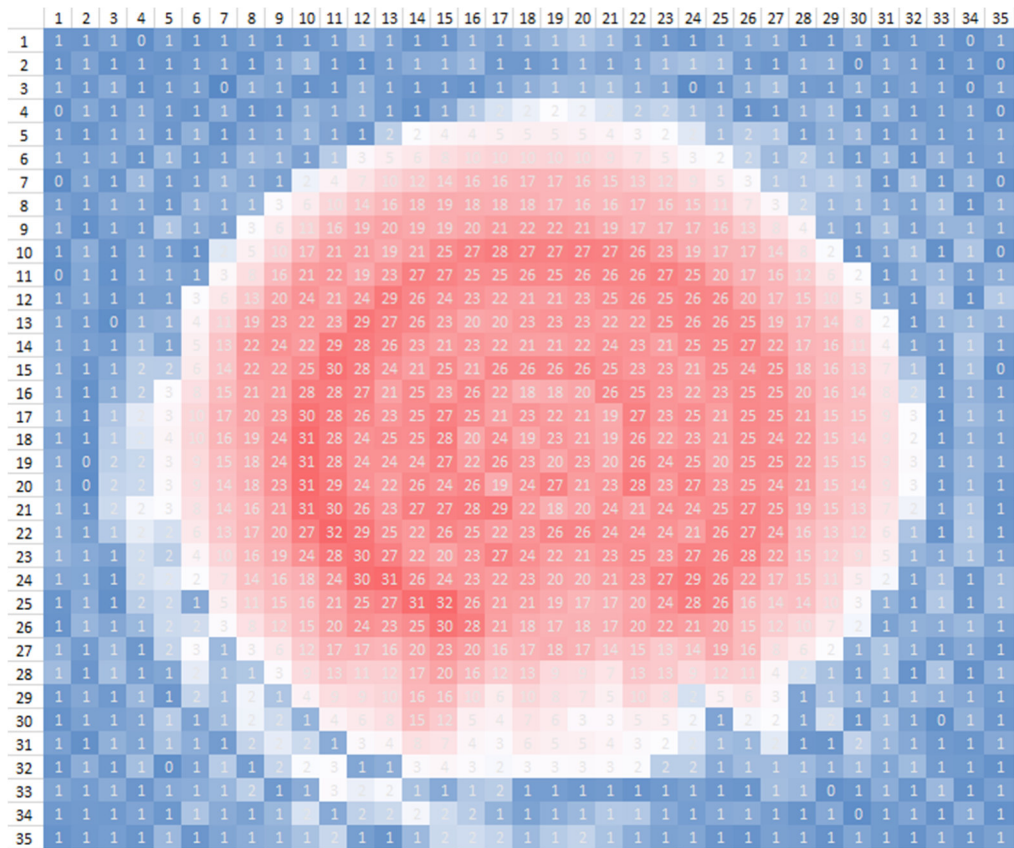
$$A_{ER} = F_{ac} \cdot s^2 \cdot N. \quad (3.4)$$

Растрове сканування поля ультразвукового тиску проведено для чотирьох типів ультразвукових перетворювачів E1025-SU; E2312-SU; E3512-SU, E9906-SU фірми MANA instruments, які застосовують під час відтворення одиниці ультразвукового тиску на еталоні у діапазоні від 1 МГц до 10 МГц. Технічні характеристики УП та їх робочі частоти наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики УП та їх робочі частоти

Тип УП	Діаметр, мм	Геометрична площа, мм ²	Робоча частота, МГц
E1025-SU	25,0	490,87	1
E2312-SU	12,0	126,68	2, 3
E3512-SU	12,0	126,68	2, 3, 4
E9906-SU	6,0	28,27	5, 6, 7, 8, 9, 10

Масиви значень напруг отриманих за результатами сканування різних типів УП, які використовували для визначення кількості напруг N (3.2) і обчислення ефективних площ випромінювання (3.4) УП показано на рисунках 3.3 – 3.6.



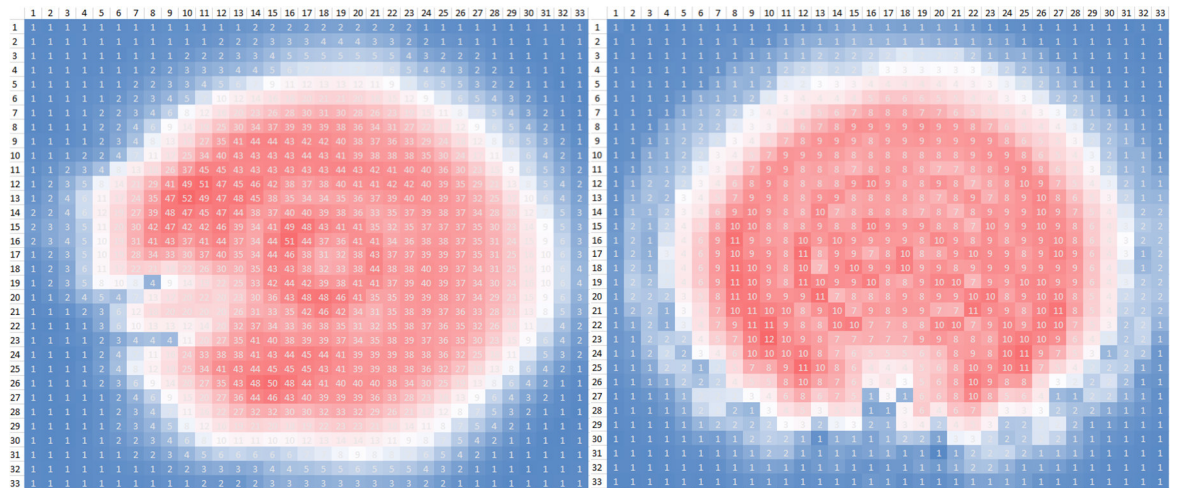
1 МГц, крок сканування 1,0 мм

Максимальна напруга (32 мВ)



Мінімальна напруга (0 мВ)

Рисунок 3.3 – Результати сканування ультразвукового поля УП Е1025-SU



2 МГц, крок сканування 0,5 мм

3 МГц, крок сканування 0,5 мм

Максимальна напруга (52 мВ)



Мінімальна напруга (1 мВ)

Рисунок 3.4 – Результати сканування ультразвукового поля УП Е2312-SU

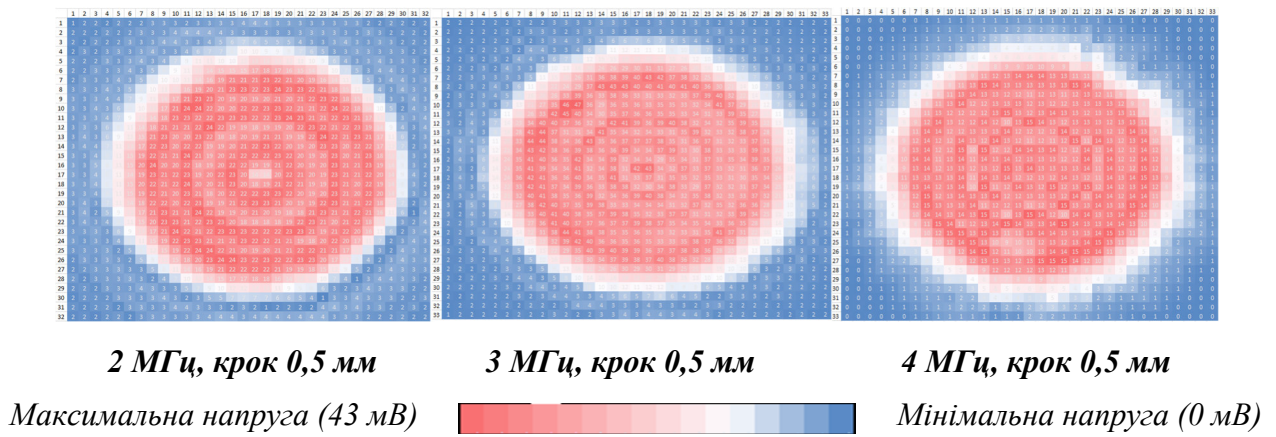


Рисунок 3.5 – Результати сканування ультразвукового поля УП Е3512-SU

Значення ефективної площі випромінювання A_{ER} допоміжних УП, отримані за результатами автоматичного растрового сканування та їх відхили від геометричної площі [10], подані в таблиці 3.2.

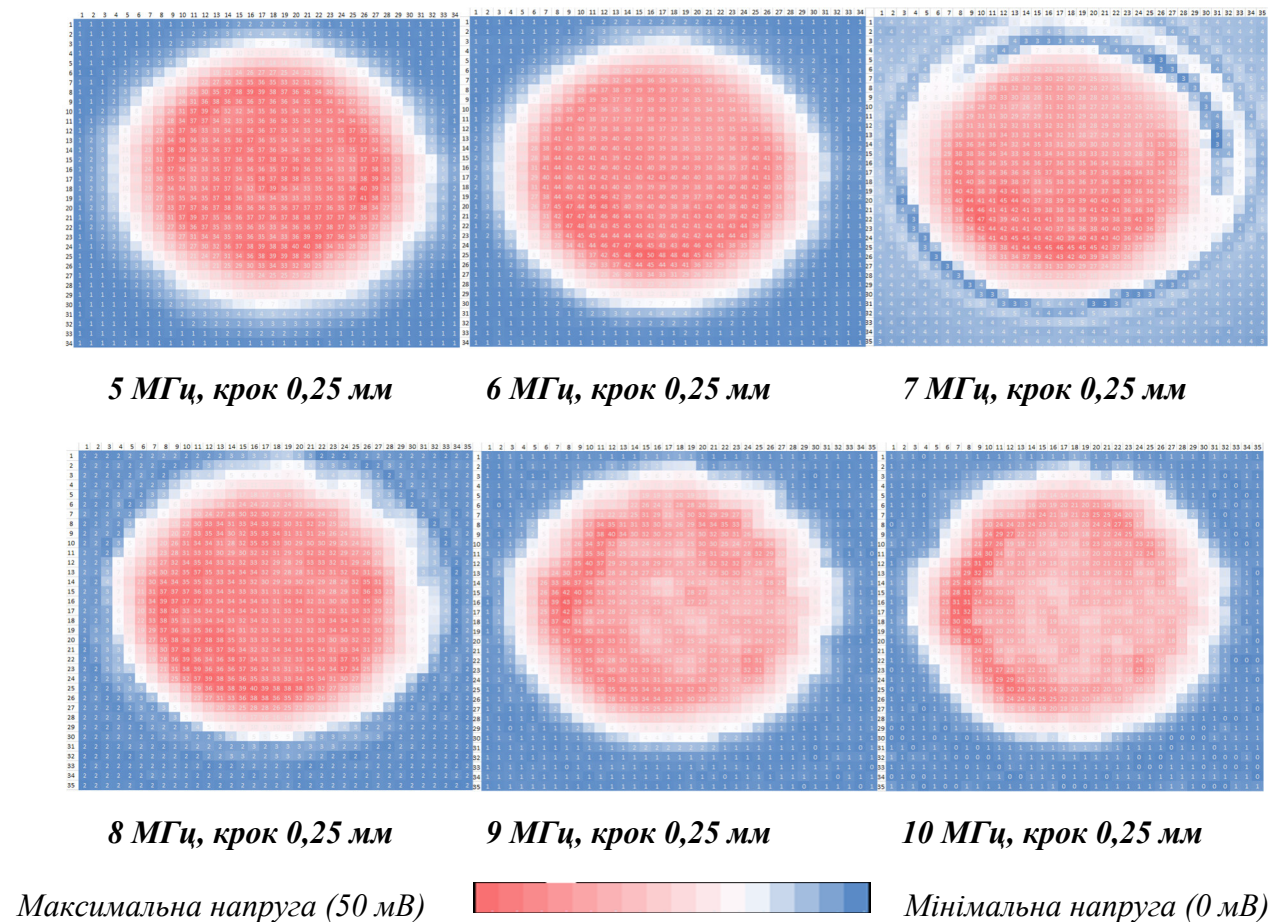


Рисунок 3.6 – Результати сканування ультразвукового поля УП Е9906-SU

Таблиця 3.2 – Значення A_{ER} допоміжних УП, отримані за результатами автоматичного растрового сканування

Тип УП	Частота, МГц	Площа геометрична, мм ²	Площа ефективна, мм ²	СКВ, %	Відхил ефективної площі від геометричної, %
E1025-SU	1,0	490,80	368,32	0,45	-25,0
E2312-SU	2,0	126,68	89,88	0,63	-29,05
	3,0		96,88	0,39	-23,52
E3512-SU	2,0	126,68	104,14	1,55	-17,79
	3,0		101,98	0,62	-19,50
	4,0		105,57	0,39	-16,66
E9906-SU	5,0	28,27	23,87	0,77	-15,56
	6,0		23,46	0,35	-17,03
	7,0		23,48	0,52	-16,95
	8,0		23,72	0,57	-16,11
	9,0		23,18	0,72	-18,03
	10,0		23,59	1,95	-16,55

3.1.2 Аналіз джерел та розрахунок невизначеності вимірювання ефективної площі A_{ER}

Стандартна невизначеність за типом В кроку сканування s , $u_{s(B)}$, залежить від вибраної кількості кроків сканування - тобто відстані переміщення вздовж осей X2, Y2 та дискретності растрової системи сканування (2 мкм). Дискретність системи є джерелом невизначеності за типом В, а оцінюють її як половину значення дискретності системи за прямокутного закону розподілу, тобто $u_{s_resol(B)} = 2/2\sqrt{3}$.

За даними виробника шарнірно-витої пари, яка застосована для лінійного переміщення у системі сканування, невилучена адитивна похибка під час переміщення на відстань 1 см становить 1,7 мкм. За припущення прямокутного закону розподілу $u_{s_add(B)} = 3,4 \cdot 1,7/\sqrt{3}$ (для лінійного переміщення на 3,4 см). Тому стандартну невизначеність за типом В кроку сканування $u_{s(B)}$ визначено як [10]:

$$u_{s(B)} = \sqrt{u_{s_resol(B)}^2 + u_{s_add(B)}^2} \cdot \quad (3.5)$$

Стандартна невизначеність за типом В параметра N , $u_{n(B)}$, залежить від трьох джерел: вимірювання середньоквадратичного значення напруги змінного струму на виході гідрофона за допомогою осцилографа $u_{n_{osc}(B)}$, лінійності системи вимірювання «гідрофон + попередній підсилювач + блок живлення (узгодження) + осцилограф» $u_{n_{lin}(B)}$, а також чутливості гідрофона $u_{n_M(B)}$. Однак чутливість гідрофона та її невизначеність можна не враховувати згідно з [6], оскільки абсолютні значення акустичного тиску не потрібні, а аналіз даних вимірювань ґрунтується на відносних вимірюваннях напруги гідрофоном (3.2), тому $u_{n_M(B)} = 0$.

Розширена невизначеність осцилографа згідно з сертифікатом калібрування становить 3% за нормального закону розподілу, тому $u_{n_{osc}(B)} = 3/\sqrt{2}$.

Лінійність системи вимірювання перевірено за допомогою окремого ультразвукового перетворювача, подаючи на нього тональний імпульсний сигнал та вимірюючи напругу, отриману гідрофоном, за допомогою осцилографа, як функцію напруги збудження ультразвукового перетворювача. На осцилографі встановили робочий діапазон вимірювання 0-100 мВ. Лінійність системи визначено у точках 10 мВ, 25 мВ, 50 мВ, 75 мВ, 100 мВ як максимальний відхил виміряного значення напруги від ідеальної лінії регресії. Нелінійність системи не перевищує 0,8 % за нормального закону розподілу у діапазоні вимірювання від 10 мВ до 100 мВ, тому $u_{n_{lin}(B)} = 0,8/\sqrt{2}$.

Стандартну невизначеність за типом В параметра N , $u_{n(B)}$, визначено як [10]:

$$u_{n(B)} = \sqrt{u_{n_{osc}(B)}^2 + u_{n_{lin}(B)}^2 + u_{n_M(B)}^2}. \quad (3.6)$$

Згідно з Додатком Е [6], стандартну невизначеність для значення $F_{ac} = 1,333$ приймають рівною нулю.

Стандартну невизначеність ефективної площі A_{ER} УП за типом А, $(u_{A_{ER}(A)})$ визначено за серією 10 незалежних спостережень згідно з [52]. Для кожного окремого вимірювання, з метою врахування усіх можливих похибок, пов'язаних

із юстуванням УП та гідрофона, повторно монтували УП та гідрофон та проводили їх юстування. Юстування залежить від точності позиціонування УП та гідрофона, механізмів їх кріплення та оператора.

Згідно з [52], комбіновану стандартну невизначеність u_c для будь-якої функції типу $Y = f(x_i)$, пов'язану з результатом вимірювання, визначають за формулою [52]:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_i^2, \quad (3.7)$$

де u_i - стандартна невизначеність, оцінена за типом А або В, пов'язана з відповідною змінною x_i , яка використовується для визначення значення функції Y ;

$\partial y / \partial x$ - коефіцієнт чутливості до змінної x_i .

Для ефективної площі A_{ER} коефіцієнти чутливості пов'язані з параметрами F_{ac} , s , N отримують шляхом часткового диференціювання формули (3.4) по відповідному параметру, і вони становлять [10]:

$$c_{F_{ac}} = \frac{\partial A_{ER}}{\partial F_{ac}} = 1; \quad c_s = \frac{\partial A_{ER}}{\partial s} = 2; \quad c_n = \frac{\partial A_{ER}}{\partial n} = 1. \quad (3.8)$$

Комбіновану стандартну невизначеність ефективної площі УП визначено за формулою [10]:

$$u_{cAER} = \sqrt{(u_{s(B)} \cdot c_s)^2 + (u_{n(B)} \cdot c_n)^2 + (u_{F_{ac}(B)} \cdot c_{F_{ac}})^2 + (u_{AER(A)})^2}. \quad (3.9)$$

Приклад розрахунку бюджету невизначеності для A_{ER} УП E1025-SU на частоті 1 МГц (крок сканування 1 мм, площа сканування 34 мм×34 мм) представлено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Бюджет невизначеності для A_{ER} УП E1025-SU на частоті 1 МГц

Величина	Оцінка	Стандартна невизн., u_i	Закон розп.	Коефіцієнт чутливості, c_i	Внесок у невизн., %	u_{CAER} , %	k (P=0,95)	U, %
Крок сканування s, мм/ $u_{s(B)}$	1,0	0,0034	норм	2	0,68	1,74	2,0	3,48
$u_{s_resol(B)}$, мм		0,0006	прям					
$u_{s_add(B)}$, мм		0,0010	прям					
Параметр N/ $u_{n(B)}$	276	1,55	норм	1	1,55			
$u_{n_osc(B)}$, %		1,5	норм					
$u_{n_lin(B)}$, %		0,4	норм					
Параметр Fac/ $u_{FAC(B)}$	1,333	0	норм	1	0,0	0,39		
$u_{AER(A)}$, %		0,45	норм	1	0,39			

Результати розрахунку ефективних площ допоміжних УП та їх невизначеність подано у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку ефективних площ допоміжних УП та їх невизначеність

Тип УП	Частота	Крок сканування	Розмір сканування (X2, Y2)	Параметр N	Ефективна площа, A_{ER}	u_C , %	k	Розширена невизначеність, U
	МГц	мм	мм	-	мм ²	%	P=0,95	%
E1025-SU	1	1,0	34	276	368,32	1,74	2	3,48
E2312-SU	2	0,5	32	268	89,88	2,05	2	4,10
	3	0,5	32	290	96,88	2,15	2	4,30
E3512-SU	2	0,5	32	306	104,14	2,58	2	5,16
	3	0,5	32	316	101,98	2,26	2	4,52
	4	0,5	32	318	105,57	2,37	2	4,74
E9906-SU	5,0	0,5	20	71	23,87	1,95	2	3,90
	6,0	0,5	20	70	23,46	1,77	2	3,54
	7,0	0,5	20	70	23,48	2,08	2	3,92
	8,0	0,5	20	71	23,72	2,05	2	4,10
	9,0	0,5	20	69	23,18	1,95	2	3,90
	10,0	0,5	20	70	23,59	2,62	2	5,70

3.2 Дослідження коефіцієнтів дифракційних втрат

Оскільки зі збільшенням частоти сигналу зростає загасання ультразвуку у воді, а також через складнощі в юстуванні УП і гідрофона на великих відстанях, часто вимірювання у діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц доводиться проводити в ближньому полі УП. Для того, щоб отримати надійні результати за таких вимірювань, потрібно застосовувати дифракційні поправки G_1 та G_2 [59, 60] до виміряних напруг U_1 та U_2 .

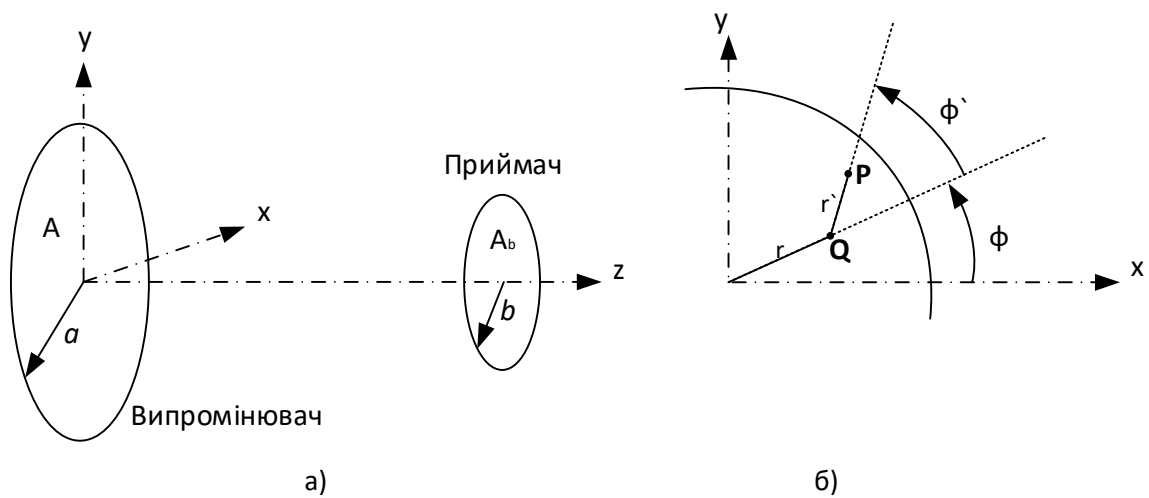


Рисунок 3.7 – Геометричне розміщення випромінювача та приймача [62]

Розглянемо точку P на випромінювачі та точку Q на приймачі з векторами позиції r_P та r_Q відповідно, які схематично зображені на рисунку 3.7, б. Акустичний тиск у точці Q випромінювача із площею A, можна визначити за допомогою інтеграла Релея [62]:

$$p_0(r_Q, t) = \frac{i\omega\rho}{2\pi} \int_P \int_A \vartheta_n \frac{e^{-ik(r_Q-r_P)}}{(r_Q-r_P)} dA. \quad (3.10)$$

Акустичний тиск усереднений на поверхні приймача із площею A_b можна визначити як [62]:

$$\bar{p} = \frac{1}{\pi b^2} \int_Q \int_{A_b} p(r_Q, t) dA_b. \quad (3.11)$$

Дифракційні втрати для приймача з площею A_b із круглим поршневим джерелом ультразвуку площею A можна розрахувати за допомогою чотирикратного інтегралу [62]:

$$\frac{\bar{p}}{p_0} = \frac{i\omega\rho}{2\pi^2 b^2} \int_Q \int_{A_b} p(r_Q, t) \int_P \int_A \vartheta_n \frac{e^{-ik(r_Q - r_P)}}{(r_Q - r_P)} dA dA_b. \quad (3.12)$$

Розв'язати інтеграл (3.12) аналітично є складною задачею, тому у літературі існують два підходи визначення дифракційних поправок:

1. за допомогою методу наближення [61], який запропонував Б. Фей, або
2. чотирикратний інтеграл аналітично зводять до однократного, після чого його обчислюють за допомогою комп'ютера [62] (К. Бейснер).

Визначення дифракційної поправки за методом Фея

У праці Фея [61] запропоновано підхід для розрахунку звукового тиску у будь якій точці на поверхні приймача (гідрофона) у звуковому полі випромінювача (УП). Для цього умовно ділять поверхню випромінювача та приймача на однакове число кілець і рахують внески до результуючого тиску на кожному кільці приймача від кожного кільця випромінювача.

Для чисельного розрахунку дифракційних втрат в звуковому полі ультразвукових перетворювачів проводяться розрахунки двох величин L_I та L_{II} [61]:

$$L_I = \sum_{n=1}^{(a+R_{A,m})/\Delta R - 1/2} \frac{\cos(k\sqrt{R_n^2 + z^2})}{\sqrt{R_n^2 + z^2}} 2(\pi - \alpha_n) R_n \Delta R, \quad (3.13)$$

$$L_{II} = \sum_{n=1}^{(a+R_{A,m})/\Delta R - 1/2} \frac{\sin(k\sqrt{R_n^2 + z^2})}{\sqrt{R_n^2 + z^2}} 2(\pi - \alpha_n) R_n \Delta R, \quad (3.14)$$

де: a – радіус випромінювача (УП), мм;

n – номер ітерації;

k – хвильове число, m^{-1} , яке розраховують як [61]:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}, \quad (3.15)$$

де: λ — довжина хвилі, м;

f — частота, Гц;

c — швидкість звуку, м/с.

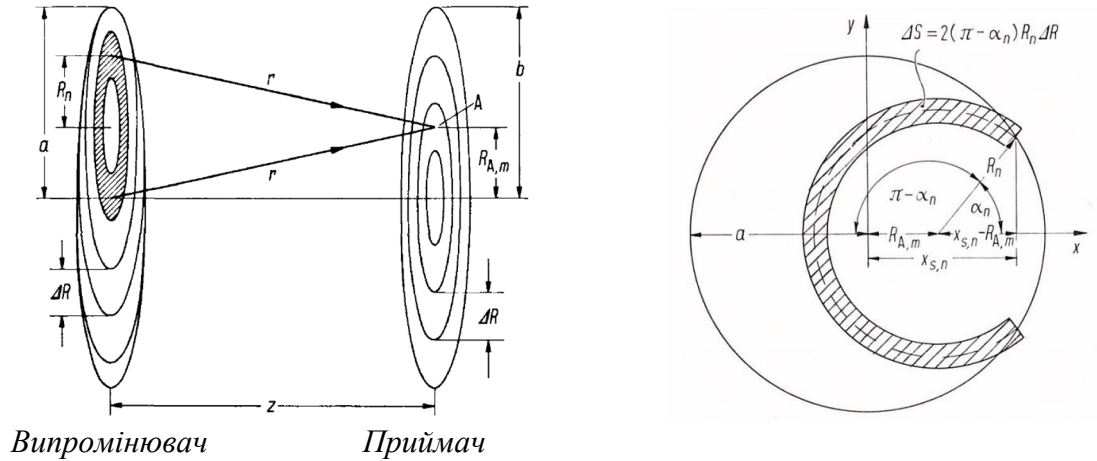


Рисунок 3.8 – Вигляд умовного кільця на поверхні випромінювача [61]

Відстань від точки A до центральної осі (рисунок 3.8) $R_{A,m}$ розраховують за формулою [61]:

$$R_{A,m} = m\Delta R - \Delta R/2 . \quad (3.16)$$

Радіус кола на поверхні випромінювача R_n (рисунок 3.8) розраховують як [61]:

$$R_n = n\Delta R - \Delta R/2 , \quad (3.17)$$

де: ΔR — ширина кільця;

z — відстань між поверхнями випромінювача та приймача, мм.

Знаючи нормовану відстань s можна вирахувати z як [61]:

$$z = \frac{sa^2}{\lambda} . \quad (3.18)$$

Кут між точкою перетину кільця з поверхнею перетворювача і горизонтом α_n (рисунок 3.8), розраховують як [61]:

$$\alpha_n = \cos^{-1} \frac{x_{s,n} - R_{A,m}}{R_n}, \quad (3.19)$$

де: $x_{s,n}$ – x -координата точки перетину кільця з поверхнею перетворювача (рисунок 3.8), яку визначають за формулою [61]:

$$x_{s,n} = \frac{a^2 + R_{A,m}^2 - R_n^2}{2R_{A,m}}. \quad (3.20)$$

Тоді, відношення тиску на поверхні приймача до тиску на поверхні випромінювача $\left| \frac{P}{P_0} \right|$, тобто величину дифракційних втрат (в літературі також позначають як G), розраховують за формулою [61]:

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = \frac{k}{2\pi} \sqrt{M_I^2 + M_{II}^2}, \quad (3.21)$$

де:

$$M_I = \sum_{m=1}^{b/\Delta R} L_I \frac{2\pi R_{A,m} \Delta R}{\pi b^2}, \quad (3.22)$$

$$M_{II} = \sum_{m=1}^{b/\Delta R} L_{II} \frac{2\pi R_{A,m} \Delta R}{\pi b^2}, \quad (3.23)$$

b – радіус приймача;

m – номер ітерації.

Згідно з описаним вище методом числового обчислення дифракційних втрат в звуковому полі ультразвукових перетворювачів створена програма «Calculation of P/P0», вигляд якої показано на рисунку 3.9.

Рисунок 3.9 – Вигляд робочого вікна програми «Calculation of P/P0» для розрахунку коефіцієнтів дифракційних втрат

Вхідними даними для програми є: частота випромінюваного сигналу, швидкість звуку в воді, кількість кілець, на які умовно поділяють випромінювач, радіус випромінювача та приймача, а також відстань між ними (приведена до вигляду нормованої s). Результатом обчислення за допомогою програми є значення коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 (метод самовзаємності) або G_2 , тобто відношення тиску на поверхні приймача до тиску на поверхні випромінювача.

Для коректного обчислення G кількість кілець, на які умовно поділяють поверхню випромінювача та приймача, має бути кратною до радіуса приймача та випромінювача, але не меншою ніж 1000.

Визначення дифракційної поправки за методом Бейснера

У праці Бейснера [62], запропоновано інтегральний вираз для визначення дифракційних втрат у стаціонарному стані плоского поля ультразвукового перетворювача, коли акустичні осі передавача та гідрофона збігаються. Спрощений інтеграл для визначення коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 у звуковому полі ультразвукового перетворювача, має вигляд [62]:

$$\frac{\bar{p}}{p_0} = e^{-ikz} - \frac{2}{\pi\gamma^2} \int_{1-\gamma}^{1+\gamma} \sqrt{1 - \left(\frac{1-\gamma^2+\beta^2}{2\beta}\right)^2} \cdot e^{-ika\sqrt{\left(\frac{z}{a}\right)^2 + (\beta)^2}} d\beta, \quad (3.24)$$

де: $\gamma = \frac{b}{a}$,

a – радіус випромінювача (УП), м;

b – радіус приймача (гідрофона), м;

k – хвильове число;

z – відстань між перетворювачами, м.

Для порівняння результатів розрахунку коефіцієнтів двома методами, які були запропоновані Б. Фейом та К. Бейснером згідно з формулами (3.21) та (3.24), відповідно, проведено розрахунок коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 . Для отримання достовірних результатів, розрахунок був проведений для двох гідрофонів з радіусами 0,25 та 0,5 мм, комплекту УП (таблиця 1.3) та на різній вимірювальній відстані, яка знаходилась у межах $0,9 \dots 3N$ (протяжності ближнього поля). Результати подано у таблиці 3.5 (для гідрофона радіусом $b = 0,25$ мм) та таблиці 3.6 (для гідрофона радіусом $b = 0,5$ мм), а графічне представлення розрахованих коефіцієнтів G_1 та G_2 для УП типу E2312 та E9906 подано на рисунку 3.10.

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти G_1 та G_2 для гідрофона радіусом $b = 0,25$ мм

Тип УП		E1025	E2312	E3512	E3512	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906
		N=1	N=2	N=2	N=2	N=2	N=2	N=2	N=2	N=2	N=2
F	MHz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ	мм	1,48	0,74	0,49	0,37	0,30	0,25	0,21	0,18	0,16	0,15
a	м	0,00982	0,00575	0,006021	0,006067	0,0029754	0,002909	0,002899	0,002827	0,002753	0,002775
b	м	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025
ρ	кг/м ³	998,58	998,58	998,45	998,58	998,45	998,45	998,45	998,45	998,45	998,45
c	м/с	1476,1	1476,1	1479,2	1476,1	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2
z	м	0,065329	0,08959	0,14705	0,19949	0,05985	0,06865	0,07954	0,08645	0,09223	0,10412
FAY	G _{1F}	0,8117	0,75287	0,7522	0,7520	0,75241	0,75222	0,75209	0,75202	0,752074	0,751998
	G _{2F}	1,9968	1,4114	1,4127	1,4123	1,4077	1,4073	1,4074	1,4071	1,4068	1,40675
Beissner	G _{1B}	0,8117	0,7529	0,7522	0,7520	0,7524	0,7522	0,7521	0,752	0,752	0,7519
	G _{2B}	1,9968	1,4115	1,4123	1,4125	1,4074	1,4073	1,4074	1,4071	1,4068	1,407
	d _{i(G1)}	0,0000	-0,00003	0,0000	-0,00002	0,00001	0,00002	-0,00001	0,00002	0,00007	0,0001
	d _{i(G2)}	0,0000	-0,00010	0,00040	-0,00020	0,00030	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,00025

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти G_1 та G_2 для гідрофона радіусом $b = 0,5$ мм

Тип УП		E1025	E1025	E1025	E1025	E2312	E2312	E2312	E2312	E3512	E3512
		N=0,9	N=1,5	N=2	N=3	N=0,9	N=1,5	N=2,0	N=3,0	N=0,9	N=1,5
F	MHz	1				2				3	
λ	мм	1,48	1,48	1,49	1,49	0,74	0,74	0,74	0,74	0,50	0,50
a	м	0,00982	0,00982	0,00982	0,00982	0,00635	0,00635	0,00635	0,00635	0,006059	0,006059
b	м	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ρ	кг/м ³	998,11	998,11	997,91	997,91	997,91	997,91	997,91	997,91	997,78	997,78
c	м/с	1482,4	1482,4	1485,4	1485,4	1485,4	1485,4	1485,4	1485,4	1488,3	1488,3
z	м	0,05855	0,097577	0,12984	0,19476	0,04886	0,08144	0,10858	0,16288	0,0666	0,111
FAY	G_{1F}	0,8055	0,7410	0,7533	0,7329	0,8041	0,7411	0,7527	0,7328	0,8032	0,7412
	G_{2F}	1,9586	1,7245	1,4103	0,9987	1,936	1,7188	1,4079	0,9979	1,9309	1,7184
Beissner	G_{1B}	0,8056	0,741	0,7533	0,7329	0,8041	0,7411	0,7527	0,7328	0,8032	0,7412
	G_{2B}	1,9587	1,7246	1,4104	0,9987	1,936	1,7188	1,4079	0,9979	1,931	1,7184
	$d_{i(G1)}$	-0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$d_{i(G2)}$	-0,0001	-0,0001	-0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	0,0000

(продовження таблиці 3.6)

Тип УП		E3512	E3512	E3512	E3512	E3512	E3512	E9906	E9906	E9906	E9906
		N=2,0	N=3,0	N=0,9	N=1,5	N=2,0	N=3,0	N=1,2	N=1,5	N=2,0	N=2,5
F	MHz	3		4				5			
λ	мм	0,50	0,50	0,37	0,37	0,37	0,37	0,30	0,30	0,30	0,30
a	м	0,006059	0,006059	0,006066	0,006066	0,006066	0,006066	0,002934	0,00293	0,00293	0,00293
b	м	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ρ	кг/м ³	997,78	997,78	997,78	997,78	997,78	997,78	998,11	998,11	998,11	998,11
c	м/с	1488,3	1488,3	1488,3	1488,3	1488,3	1488,3	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4
z	м	0,148	0,222	0,08901	0,14834	0,19779	0,29668	0,034842	0,04355	0,05807	0,07259
FAY	G_{1F}	0,7522	0,7328	0,8028	0,7413	0,7520	0,7328	0,7926	0,7412	0,7524	0,7602
	G_{2F}	1,4078	0,9978	1,9304	1,7188	1,408	0,9980	1,8379	1,6768	1,3884	1,1617
Beissner	G_{1B}	0,7522	0,7328	0,8028	0,7413	0,7520	0,7328	0,7926	0,7412	0,7524	0,7602
	G_{2B}	1,4078	0,998	1,9304	1,7188	1,4081	0,9981	1,8379	1,6768	1,3884	1,1617
	$d_{i(G1)}$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$d_{i(G2)}$	0,0000	-0,0002	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

(продовження таблиці 3.6)

Тип УП		E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906
		N=3	N=1,2	N=1,5	N=2,0	N=2,5	N=3	N=1,2	N=1,5	N=2,0	N=2,5
F	MHz	5	6					7			
λ	мм	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,21	0,21	0,21	0,21
a	м	0,00293	0,002909	0,002909	0,002909	0,002909	0,002909	0,002899	0,002899	0,002899	0,002899
b	м	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ρ	кг/м ³	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11
c	м/с	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4
z	м	0,08711	0,041101	0,051377	0,068502	0,085628	0,102753	0,047622	0,059528	0,07937	0,099213
FAY	G _{1F}	0,7328	0,7928	0,7412	0,7522	0,7601	0,7328	0,7929	0,7412	0,7521	0,7600
	G _{2F}	0,9918	1,8365	1,6761	1,3881	1,1616	0,9917	1,836	1,6759	1,388	1,1616
Beissner	G _{1B}	0,7328	0,7928	0,7412	0,7522	0,7601	0,7328	0,793	0,7412	0,7521	0,7601
	G _{2B}	0,9918	1,8365	1,6761	1,3881	1,1616	0,9917	1,836	1,6759	1,3881	1,1616
	d _{i(G1)}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	0,0000	0,0000	-0,0001
	d _{i(G2)}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	0,0000

(продовження таблиці 3.6)

Тип УП		E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906
		N=3	N=1,2	N=1,5	N=2,0	N=2,5	N=3	N=1,2	N=1,5	N=2,0	N=2,5
F	MHz	7	8					9			
λ	мм	0,21	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,16	0,16	0,16	0,16
a	м	0,002899	0,00283	0,002827	0,002827	0,002827	0,002827	0,002753	0,002753	0,002753	0,002753
b	м	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ρ	кг/м ³	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11
c	м/с	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4
z	м	0,119056	0,05176	0,064695	0,086259	0,107824	0,129389	0,055217	0,069021	0,092028	0,115035
FAY	G _{1F}	0,7327	0,7930	0,7413	0,752	0,7600	0,7328	0,7931	0,7412	0,752	0,7600
	G _{2F}	0,9917	1,8312	1,6732	1,3868	1,1609	0,9913	1,826	1,6701	1,3854	1,1601
Beissner	G _{1B}	0,7328	0,793	0,7412	0,752	0,7600	0,7328	0,7931	0,7413	0,752	0,76
	G _{2B}	0,9917	1,8312	1,6732	1,3868	1,1609	0,9913	1,826	1,6702	1,3854	1,1602
	d _{i(G1)}	-0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	0,0000	0,0000
	d _{i(G2)}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	0,0000	-0,0001

(кінець таблиці 3.6)

Тип УП		E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906
		N=3	N=1,2	N=1,5	N=2,0	N=2,5	N=3
F	MHz	9	10				
λ	мм	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
a	м	0,002753	0,002775	0,002775	0,002775	0,002775	0,002775
b	м	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
ρ	кг/м ³	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11	998,11
c	м/с	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4	1482,4
z	м	0,138042	0,062336	0,077921	0,103894	0,129868	0,155841
FAY	G _{1F}	0,7328	0,7931	0,7412	0,7519	0,7599	0,7327
	G _{2F}	0,9909	1,8276	1,6711	1,3858	1,1604	0,991
Beissner	G _{1B}	0,7328	0,7931	0,7413	0,7519	0,76	0,7328
	G _{2B}	0,9909	1,8276	1,6712	1,3859	1,1604	0,991
	d _{i(G1)}	0,0000	0,0000	-0,0001	0,0000	-0,0001	-0,0001
	d _{i(G2)}	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0001	0,0000	0,0000

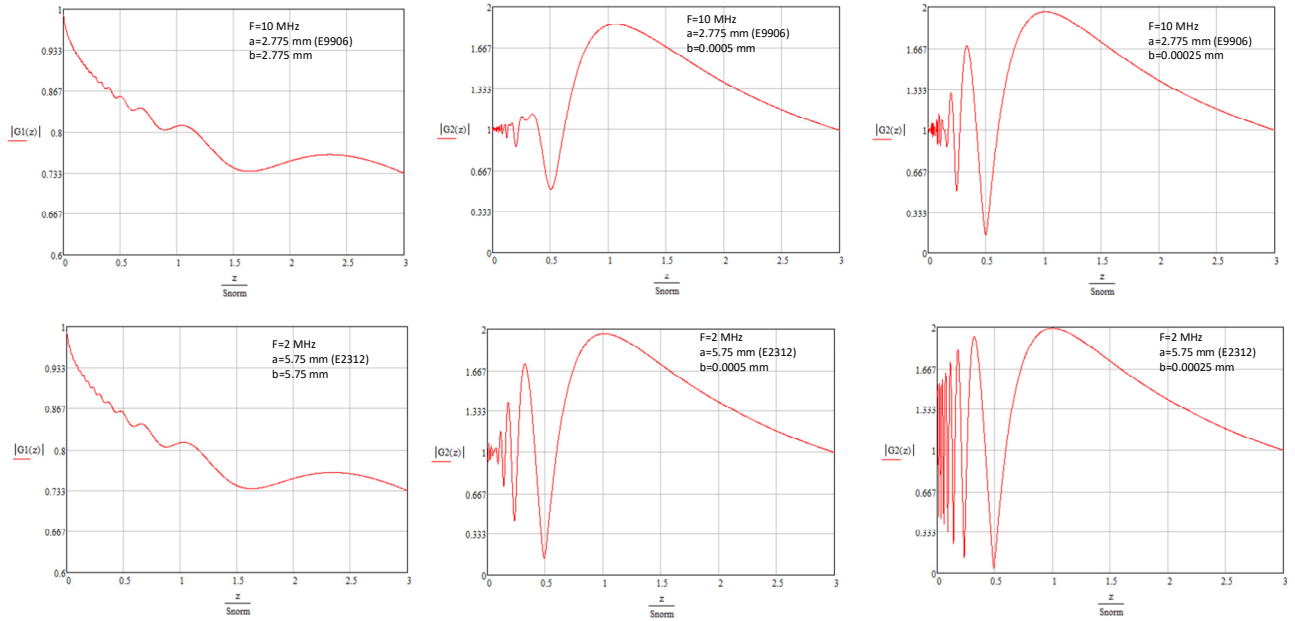


Рисунок 3.10 – Результати розрахунку коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 для УП типу E2312 та E9906

Перевірку узгодженості двох методів розрахунку коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 проведено за допомогою методу Бланда-Альтмана. Спочатку розраховано різниці між двома методами розрахунку для коефіцієнтів G_1 та G_2 згідно з [39]:

$$d_i = G_{Fi} - G_{Bi} . \quad (3.25)$$

Далі визначено середнє значення різниць $\bar{d}$ та середній квадратичний відхил σ_d для коефіцієнтів G_1 та G_2 згідно з [39]:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i , \quad (3.26)$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} . \quad (3.27)$$

Після чого визначено межі узгодженості LoA для різниць між двома методами розрахунку для коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 згідно з [39]:

$$LoA = \bar{d} \pm t * \sigma_d , \quad (3.28)$$

де t – критерій Стюдента за довірчої ймовірності 99% (при $n = 54$ становить 2,397).

Якщо більшість визначених різниць d_i для коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 лежать у межах довірчого інтервалу LoA , то методи розрахунку вважають узгодженими.

На основі даних наведених у таблицях 3.5 та 3.6 для коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 проведено розрахунок різниць d_i (3.25) та меж узгодженості LoA (3.26), які подано графічно: для коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 - на рисунку 3.11, G_2 - на рисунку 3.12.

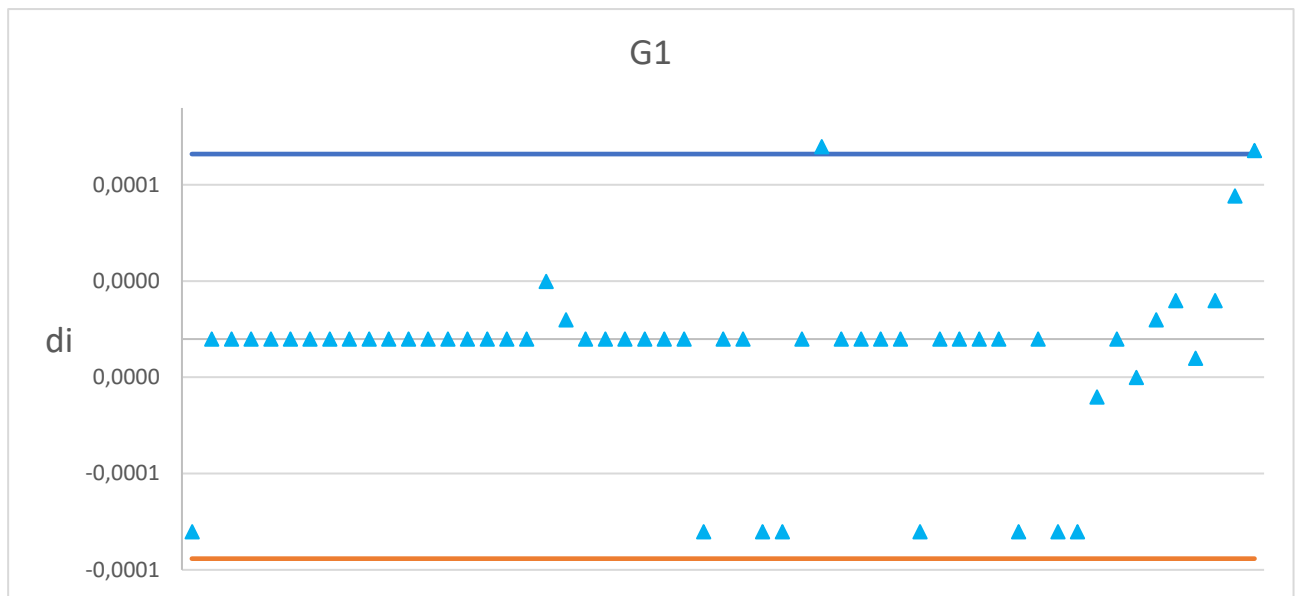


Рисунок 3.11 – Розрахунок різниць d_i та меж узгодженості LoA коефіцієнта дифракційних втрат G_1

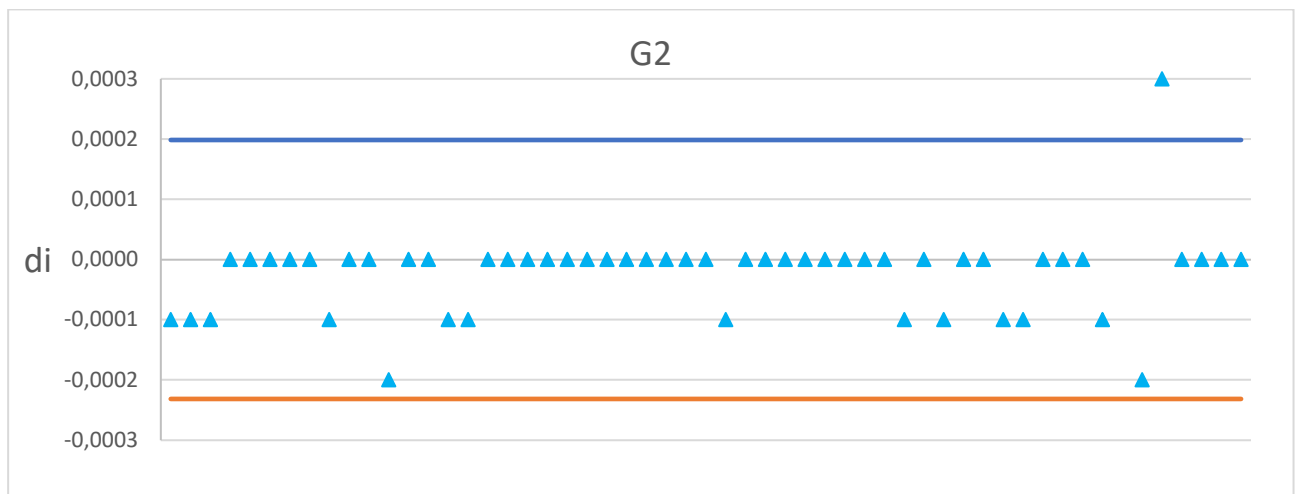


Рисунок 3.12 – Розрахунок різниць d_i та меж узгодженості LoA коефіцієнта дифракційних втрат G_2

З рисунків 3.11 та 3.12 видно, що обидва методи показують узгодженість, оскільки переважна більшість отриманих значень різниць d_i для коефіцієнтів G_1 та G_2 не виходять за визначені межі узгодженості (від LoA_- до LoA_+). Отримані результати розрахунку коефіцієнтів G_1 та G_2 підтверджують надійність та взаємозамінність методик Фея та Бейснера залежно від доступних обчислювальних засобів та є важливими для практичного використання.

Границю похибки для коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 можна встановити як:

$$\Delta_G = |LoA_+| + |LoA_-|. \quad (3.29)$$

Згідно з (3.38) та (3.29) розрахована границя похибки для коефіцієнта дифракційних втрат G_1 становить $\Delta_{G1} = 0,00021$, а для G_2 – $\Delta_{G2} = 0,00043$. Відповідно, відносна похибка розрахунку значень коефіцієнтів G_1 та G_2 не перевищує 0,1%.

Тому, у бюджеті невизначеності передавальної характеристики гідрофона для коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 треба застосовувати границю похибки 0,1%, що є суттєво меншим порівняно з границею похибки, наведеною у розділі 2.2 (таблиця 2.7).

3.3 Визначення ефективного радіуса допоміжного ультразвукового перетворювача та дослідження його впливу на вимірювальну відстань

Використання геометричного радіуса УП замість його ефективного радіуса впливає на розрахункове значення протяжності ближнього поля (N) УП. Як було показано у розділі 2, це може суттєво вплинути на розрахунок значення вимірювальної відстані d та коефіцієнтів дифракції G_1 та G_2 . Оскільки d , G_1 та G_2 , є параметрами математичної моделі для визначення передавальної характеристики гідрофона $M_h(f)$ (2.12), то заміна геометричного радіуса УП ефективним вплине на точність калібрування гідрофонів. Тому метою дослідження є оцінити вплив застосування ефективного радіуса УП замість

геометричного у розрахунку вимірювальної відстані та коефіцієнтів дифракційних втрат.

3.3.1 Визначення ефективного радіуса ультразвукового перетворювача

Ефективний радіус, a_{tr} , допоміжного УП визначають використовуючи відстань до останнього мінімуму ультразвукового поля УП d_{min} , який визначають із графіка залежності амплітуди ультразвукового тиску від відстані вздовж акустичної осі УП. Під час вимірювання для визначення ефективного радіуса, УП можна збуджувати як безперервною синусоїдальною напругою так і за допомогою тонального імпульсного сигналу. У випадку збудження тональним імпульсним сигналом, його тривалість має бути достатньою для встановлення стаціонарних умов ультразвукового поля, та коректного вимірювання середньоквадратичного значення напруги на виході гідрофона за допомогою осцилографа.

Теоретичний розподіл тиску для поршнеподібного УП можна визначити із рівняння [40]:

$$\frac{P_i}{P_0} = 2 \cdot \left(\sin \frac{\pi}{\lambda} \left(\sqrt{d_i^2 + a_{tr}^2} - d_i \right) \cdot e^{-\alpha \cdot d_i} \right), \quad (3.30)$$

де: P_0 – ультразвуковий тиск на поверхні УП, Па;

P_i – ультразвуковий тиск на відстані d_i , Па;

λ – довжина звукової хвилі у воді, м;

α – коефіцієнт загасання звукової хвилі у воді, $\text{Гц}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$.

На рисунку 3.13 графічно представлений розподіл тиску УП, розрахований згідно з (3.26). Він дозволяє попередньо оцінити відстань до останнього мінімуму ультразвукового тиску створеного УП, та оптимізувати кількість точок (кроків) для лінійного сканування, щоб зробити цей процес менш часозатратним.

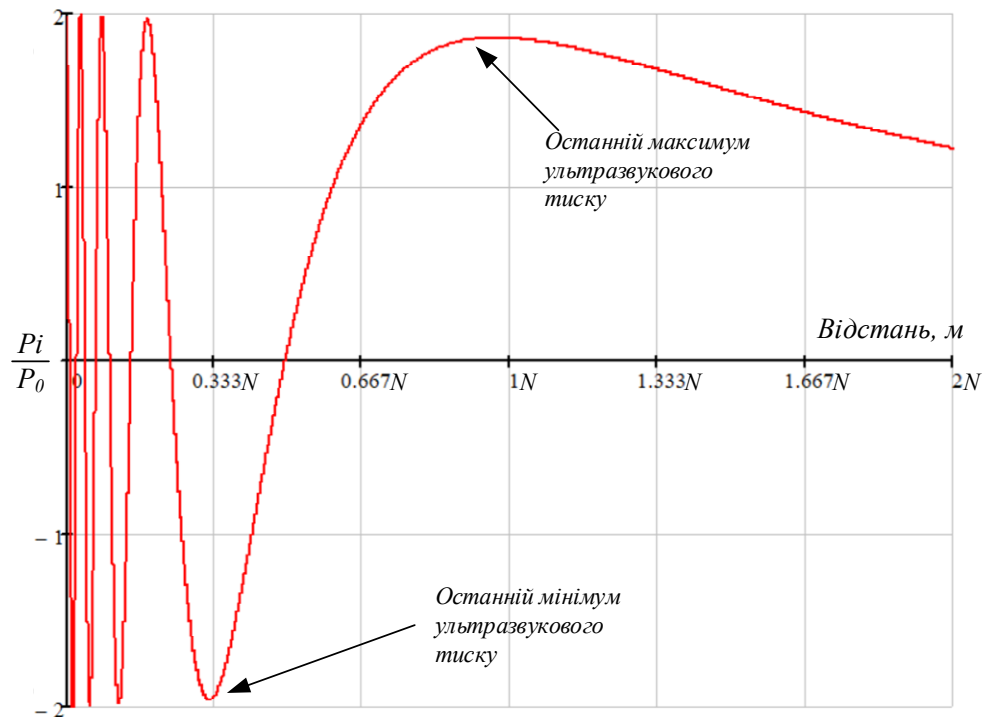


Рисунок 3.13 – Теоретичний розподіл тиску в ультразвуковому полі
УП вздовж осі Z

Для визначення відстані до останнього мінімуму ультразвукового поля УП d_{min} використано систему растрового сканування ультразвукового поля УП [10] еталона НДЕТУ AUV-02-2018, функціональна схема якої показана на рисунку 2.2.

Відстань до останнього мінімуму визначають методом лінійного сканування ультразвукового поля УП голковим гідрофоном діаметром 0,5 мм з дискретним кроком вздовж осі симетрії (Z) ультразвукового променю УП (рисунок 3.14), застосовуючи процедуру:

- перед початком вимірювання проведено вирівнювання УП та гідрофона за допомогою КПППГ, так щоб геометричний центр УП та гідрофона знаходились на одній осі;
- використовуючи геометричний радіус УП відповідно до (1.12) розраховано N , м;
- встановлено гідрофон на відстані $d = N$ від УП вздовж осі Z ;
- за допомогою КПППГ проведено суміщення акустичних осей гідрофона та УП шляхом знаходження максимального рівня напруги з гідрофона на осцилографі;

– проведено автоматичне лінійне сканування, переміщуючи гідрофон з точки N у напрямку до поверхні УП з дискретним кроком, вимірюючи значення напруги на гідрофоні осцилографом в кожній точці сканування. Вибір кроку переміщення залежить від частоти збудження УП, і має бути меншим ніж довжина хвилі на частоті збудження УП. Наприклад, для частоти 1 МГц крок становив 1,0 мм, а для частоти 10 МГц – 0,1 мм;

– відстань, на якій зареєстровано найменше значення напруги на гідрофоні, відповідає d_{min} .

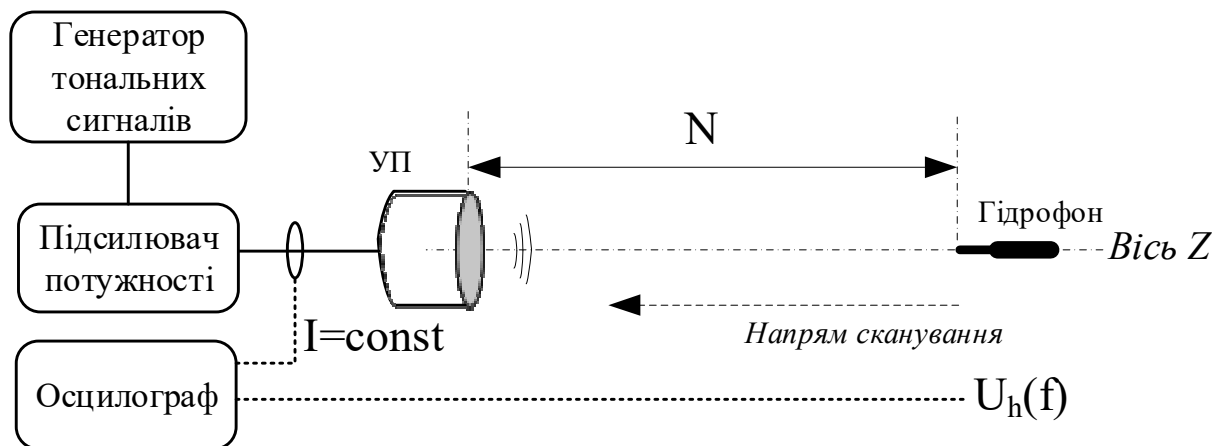


Рисунок 3.14 – Функціональна схема лінійного сканування ультразвукового поля УП для визначення d_{min}

Для проведення автоматичного лінійного сканування у програмному забезпеченні «*Acoustic etalon*» реалізовано додаткову процедуру, яка дозволяє автоматично переміщувати гідрофон вздовж осі Z із заданим кроком та реєструвати відповідні значення напруги на виході гідрофона за допомогою осцилографа TDS2024 у кожній точці сканування (див. рисунок 3.15).

Значення кроку (мм) задають у полі «Step», а загальну кількість кроків вздовж осі сканування – в полі «Z». У полі «Time» вказують час затримки (с) між кроками, який необхідний для стабілізації ультразвукового поля після переміщення гідрофона та зчитування СКЗ напруги осцилографом. Осцилограф під'єднано до персонального комп'ютера з програмним забезпеченням через інтерфейс USB. Результати вимірювання відстані d_i та СКЗ напруги під час

сканування записуються у файл формату .txt, який в подальшому використовують для визначення d_{min} та ефективного радіуса УП a_{tr} .

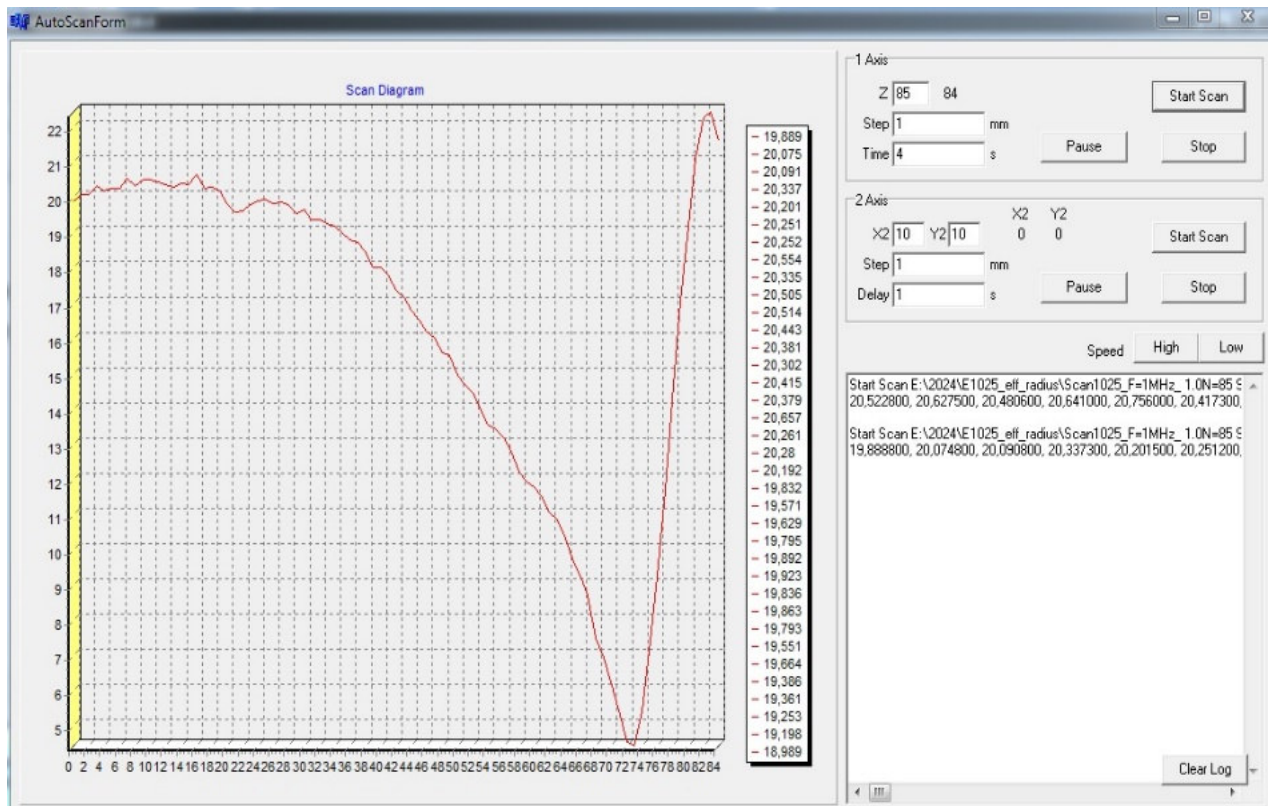


Рисунок 3.15 – Програмне забезпечення «Acoustic etalon» для лінійного сканування ультразвукового поля УП

Після отримання вимірювальних даних та розрахунку d_{min} , ефективний радіус УП, a_{tr} , м, визначено згідно з формулою [65]:

$$a_{tr} = \sqrt{2\lambda d_{min} + \lambda^2}, \quad (3.31)$$

де: d_{min} – відстань від поверхні УП до останнього мінімуму амплітуди тиску на акустичній осі ультразвукового променя, м.

Вимірювання ефективного радіуса проведено для комплекту допоміжних УП на частотах згідно з таблицею 2.1. Приклад отриманих результатів вимірювання відстані до останнього мінімуму d_{min} для УП типу E2312-SU (2 МГц) та E9906-SU (8 МГц) представлено на рисунку 3.16.

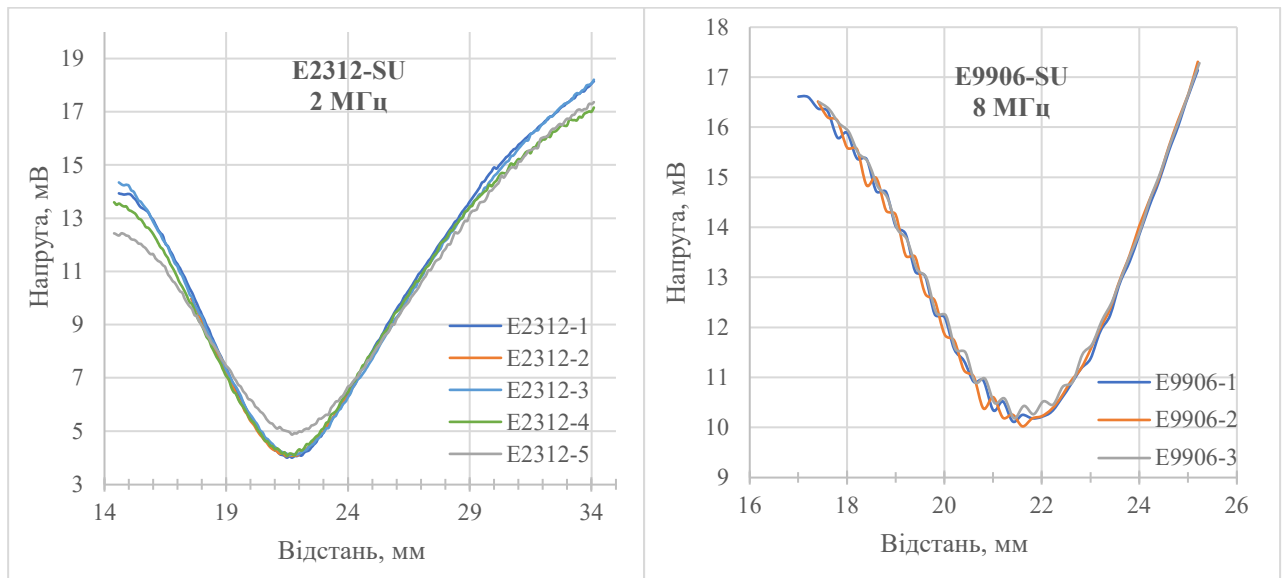


Рисунок 3.16 – СКЗ напруги на гідрофоні в околі останнього мінімуму d_{min} УП

Результати розрахунку ефективного радіуса допоміжних УП включно з сумарною стандартною невизначеністю [11], а також розрахований відхил ефективного радіуса від геометричного подано в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Ефективні радіуси допоміжних УП

Тип УП	E1025	E2312	E3512	E3512	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906	E9906
Частота, МГц	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
Геометричний радіус УП, мм	12,5	6,0	6,0	6,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Ефективний радіус УП, a_{tr} , мм	12,0	5,75	6,05	6,08	2,93	2,91	2,90	2,83	2,76	2,78
$u_{c(a_{tr})}$, %	0,88	1,73	0,83	0,71	0,91	1,05	0,84	0,91	0,47	0,78
Відхил ефективного радіусу УП від геометричного, %	-4,0	-4,2	+0,8	+1,3	-2,3	-3,0	-3,3	-5,7	-8,0	-7,3

3.3.2 Розрахунок невизначеності вимірювання ефективного радіуса УП

Відповідно до [52], для математичної моделі ефективного радіуса, a_{tr} , розраховують коефіцієнти чутливості, пов'язані з параметрами d_{min} та λ , шляхом часткового диференціювання формули (3.27) по відповідному параметру, і вони становлять [11]:

$$c_{dmin} = \frac{\partial a_{tr}}{\partial d_{min}} = 0.5; c_{\lambda} = \frac{\partial a_{tr}}{\partial \lambda} = 0.5. \quad (3.32)$$

Під час лінійного сканування, для визначення параметра d_{min} джерелами невизначеності є:

- крок сканування, наприклад 1,0 мм, відноситься до невизначеності типу В, її оцінюють як половину значення кроку сканування за прямокутного закону розподілу, тобто $u_{step(B)} = 1,0/2\sqrt{3}$ (мм);

- довжина сканування вздовж осі Z – за даними виробника шарнірно-витої пари, яка застосована у КПППГ для лінійного переміщення, невилучена адитивна похибка переміщення на відстань 10 мм становить 0,0017 мм. Тому, наприклад, для лінійного переміщення на відстань 100 мм, за припущення прямокутного закону розподілу стандартна невизначеність становить $u_{add_scan(B)} = 100,0 \cdot 0,0017/\sqrt{3}$ (мм).

- СКЗ напруги на виході гідрофона, виміряне за допомогою осцилографа. Проте, під час вимірювання відстані до останнього мінімуму УП абсолютне значення ультразвукового тиску не потрібне, оскільки нас цікавить тільки його відносна зміна, тому чутливістю гідрофона та точністю вимірювання напруги осцилографом можна знехтувати, а вклад від цих джерел невизначеності можна прийняти $u_{hydr(B)} = 0$.

Стандартну невизначеність за типом В для лінійного сканування $u_{dmin(B)}$ визначено як [11]:

$$u_{dmin(B)} = \sqrt{u_{step(B)}^2 + u_{add_scan(B)}^2 + u_{hydr(B)}^2}. \quad (3.33)$$

Стандартна невизначеність за типом В параметра λ , $u_{\lambda(B)}$, залежить від невизначеності результату вимірювання температури води. Температуру води виміряно приладом Check Temp1 фірми Hanna, розширена невизначеність якого згідно із сертифікатом калібрування становить 0,25% за нормального закону розподілу, тому $u_{\lambda(B)} = 0,25/2$ (%).

Стандартну невизначеність ефективного радіуса УП за типом А, $u_{a_{tr}(A)}$ визначено за серією з 10 незалежних спостережень згідно з [52]. Для кожного вимірювання d_{min} проведено окреме монтування та юстування УП і гідрофона,

щоб врахувати усі можливі похибки від неточності позиціонування УП та гідрофона, механізмів кріплення та оператора.

Сумарну стандартну невизначеність ефективного радіуса УП, $u_{c(a_{tr})}$, розраховано відповідно до [52]:

$$u_{CAER} = \sqrt{(u_{s(B)} \cdot c_s)^2 + (u_{n(B)} \cdot c_n)^2 + (u_{F_{ac}(B)} \cdot c_{F_{ac}})^2 + (u_{AER(A)})^2} \cdot (3.34)$$

Приклад розрахунку бюджету невизначеності для a_{tr} УП E2312 на частоті 2 МГц (крок сканування 0,1 мм, переміщення вздовж осі Z – 20 мм) представлено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Бюджет невизначеності для a_{tr} УП E2312 на частоті 2 МГц

Величина	Оцінка	Закон розподілу	Стандартна невизначеність, u_i	Коефіцієнт чутливості, c_i	Внесок у невизначеність, %	$u_{c(a_{rr})}$, %
Останній мінімум, d_{min} , мм	21,95	норм	0,035	0,5	0,08	1,73
$u_{step(B)}$, мм	0,1	прям	0,029	-	-	
$u_{add_scan(B)}$, мм	0,0017	прям	0,020			
$u_{hydr(B)}$	0	норм	0			
Довжина хвилі звуку, λ , мм	0,741	норм	0,0009265	0,5	0,06	
$u_{\lambda(B)}$, %	0,250	норм	0,125	-	-	
$u_{a_{rr}(A)}$, %	-	норм	1,72	1	1,72	

3.3.3 Аналіз отриманих результатів дослідження

Відповідно до отриманих результатів (таблиця 3.7) проведено розрахунок протяжності ближнього поля N відповідно до формули (1.12) та коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 і G_2 згідно з [61] за використання ефективного та геометричного радіусів відповідного УП, у діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц. Для розрахунку G_1 і G_2 використано такі значення: вимірювальна відстань (нормована) $d = 1N$, радіус гідрофона – 0,25 мм, швидкість звуку у воді – 1476 м/с.

Відхилення між значеннями протяжності ближнього поля N та коефіцієнтів дифракції G_1 та G_2 , отриманими за використання ефективного радіуса УП, та

значеннями цих же величин, розрахованими за використання геометричного радіуса наведено у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати розрахунку протяжності ближнього поля N та коефіцієнтів дифракції G_1 та G_2 за використання геометричного та ефективного радіуса УП

Частота, МГц	Тип УП	Параметр	Для ефективного радіуса УП	Для геометричного радіуса УП	Відхил, %
1	E1025	N, мм	97,56	105,86	-7,84
		G1 (1N)	0,8041	0,8104	0,78
		G2 (1N)	1,9014	1,9988	5,12
		λ , мм	1,476		
2	E2312	N, мм	22,4	24,39	-0,16
		G1 (1N)	0,8053	0,8106	0,66
		G2 (1N)	1,9579	1,9757	0,91
		λ , мм	0,738		
3	E3512	N, мм	24,80	24,39	1,67
		G1 (1N)	0,8100	0,8092	-0,10
		G2 (1N)	1,9749	1,9757	0,04
		λ , мм	0,493		
4	E3512	N, мм	25,04	24,39	2,68
		G1	0,8098	0,8088	-0,12
		G2	1,9898	1,9915	0,09
		λ , мм	0,36975		
5	E9906	N, мм	5,82	6,10	-4,61
		G1	0,8064	0,8097	0,41
		G2	1,9569	1,9664	0,49
		λ , мм	0,2958		
6	E9906	N, мм	5,74	6,10	-5,91
		G1	0,8052	0,8092	0,50
		G2	1,9528	1,9663	0,69
		λ , мм	0,2465		
7	E9906	N, мм	5,70	6,10	-6,56
		G1	0,8043	0,8089	0,57
		G2	1,9480	1,9663	0,94
		λ , мм	0,2113		
8	E9906	N, мм	5,43	6,10	-11,01
		G1	0,8027	0,8088	0,76
		G2	1,9217	1,9663	2,32
		λ , мм	0,1849		
9	E9906	N, мм	5,16	6,10	-15,36
		G1	0,8049	0,8086	0,46
		G2	1,8801	1,9662	4,58
		λ , мм	0,1643		
10	E9906	N, мм	52,36	60,98	-14,13
		G1	0,8039	0,8085	0,57
		G2	1,8879	1,9739	4,56
		λ , мм	0,1476		

Аналіз результатів розрахунків (таблиця 3.9) показує, що відхил коефіцієнта дифракції G_1 , визначеного з урахуванням ефективного радіуса УП у порівнянні з геометричним радіусом УП, є незначним і не перевищує 1 %. Водночас, вплив застосування ефективного радіуса УП на відхил коефіцієнта дифракції G_2 є значним на частоті 1 МГц (5,1 %), і зростає зі збільшенням частоти до 10 МГц (до 5%).

Використання ефективного та геометричного радіуса УП при розрахунку протяжності ближнього поля приводить до різних значень N . Відмінність між цими радіусами (таблиця 3.7) впливає на результат обчислення протяжності ближнього поля N УП в межах від 0,16% до 15,4% (таблиця 3.9), залежно від частоти та типу УП. Таким чином визначення ефективного радіуса є важливим, оскільки він впливає на вибір точки вимірювання (відстань d), яка в свою чергу, впливає на вимірювані значення напруг U_1 та U_2 . Це безпосередньо впливає на точність отриманих даних під час калібрування гідрофона.

Для перевірки отриманих результатів вимірювання ефективного радіуса, проведено порівняння розподілів тиску: теоретичного, визначеного за формулою (3.26) для геометричного радіуса УП, та емпіричного тиску – який визначено шляхом сканування розподілу тиску УП вздовж осі в діапазоні від $0,2N$ до $3N$, після чого для розрахунку протяжності вільного поля N використано визначений ефективний радіус УП (таблиця 3.7).

За умови правильного визначення ефективного радіуса УП, теоретичний розподіл тиску УП визначений за формулою (3.26), повинен співпадати з розподілом тиску УП, який виміряно експериментально у діапазоні від $1N$ до $3N$, тобто в умовах вільного поля для кожного окремого УП. Результати визначення розподілу ультразвукового тиску для комплекту УП (таблиця 2.1) подано на рисунках 3.17 – 3.26.

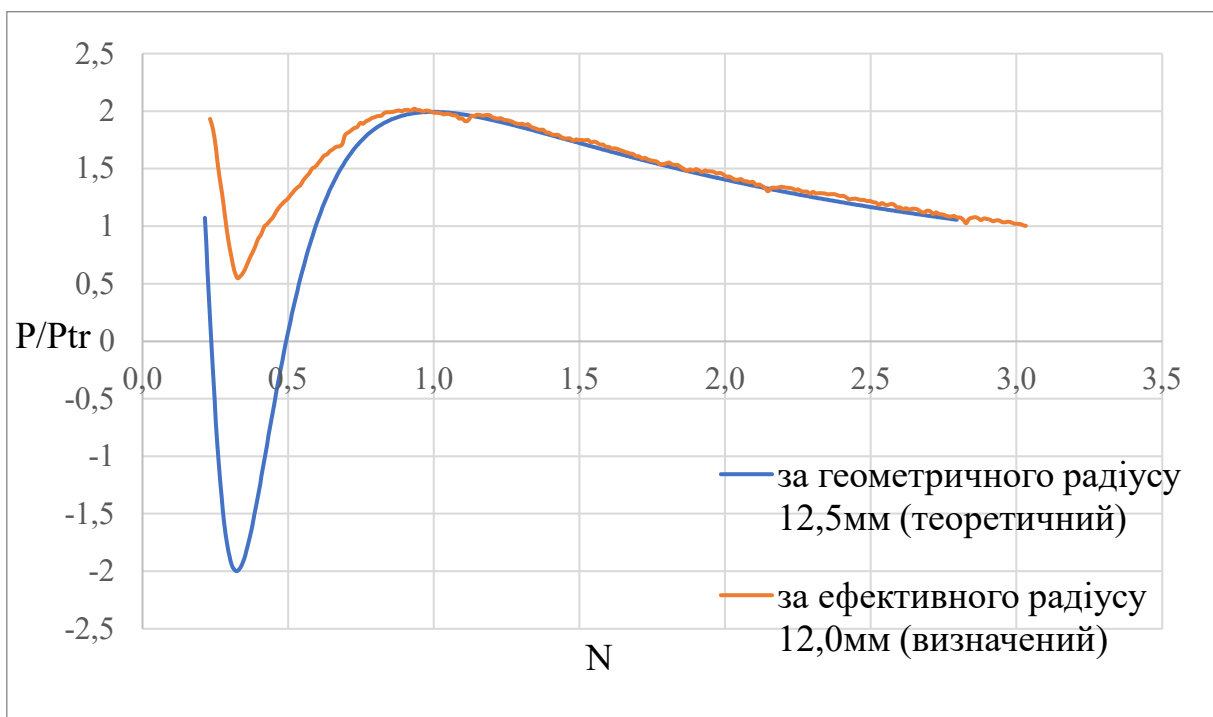


Рисунок 3.17 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е1025 на частоті 1 МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 12,5 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 12,0 мм)

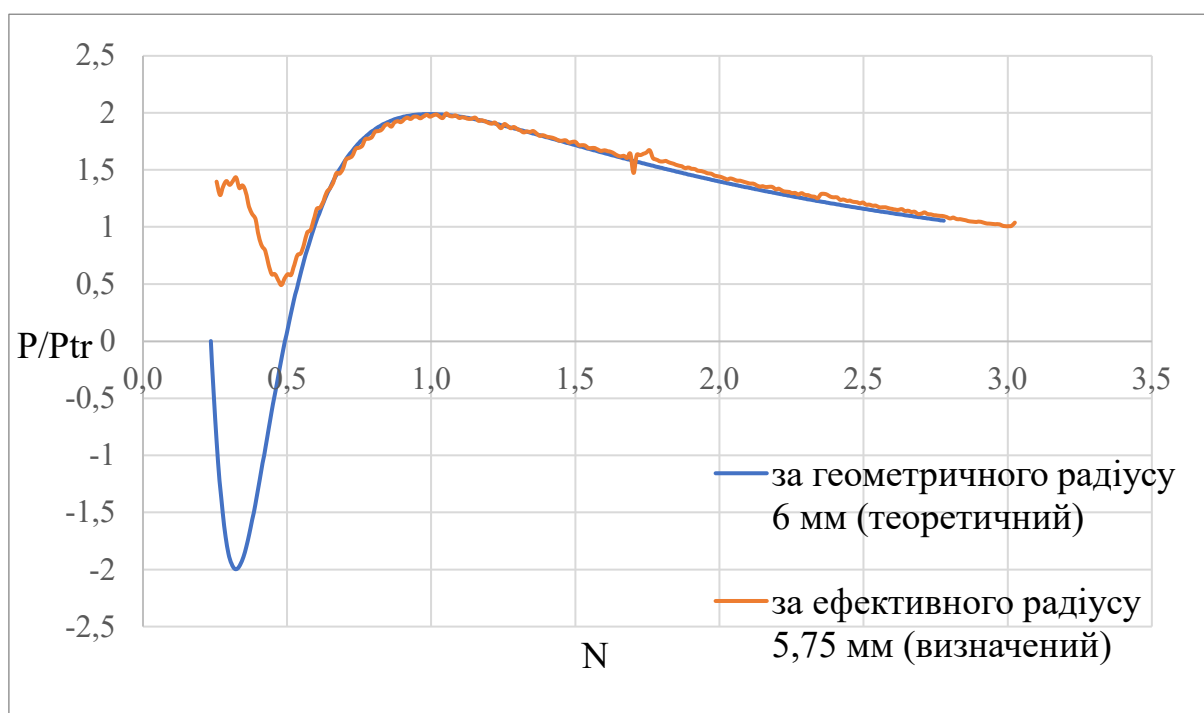


Рисунок 3.18 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е2312 на частоті 2 МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 6,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 5,75 мм)

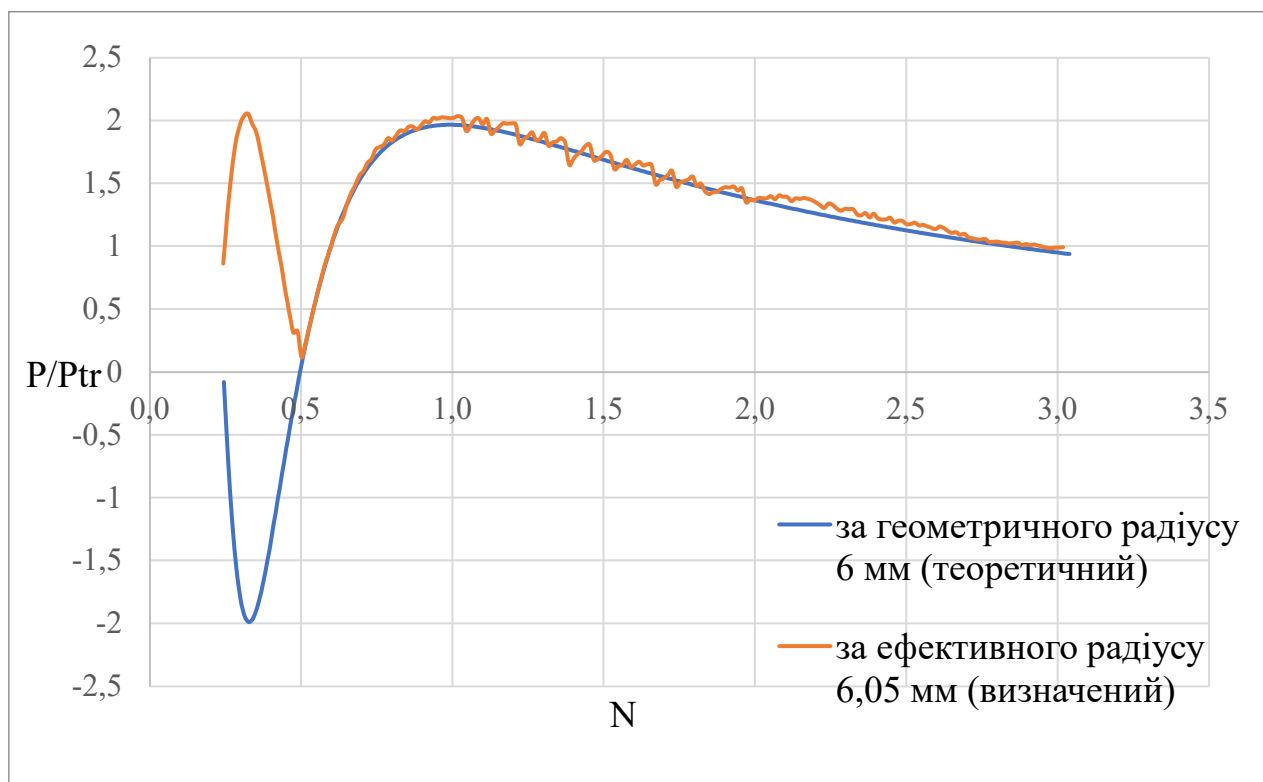


Рисунок 3.19 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е3512 на частоті 3МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 6,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 6,02 мм)

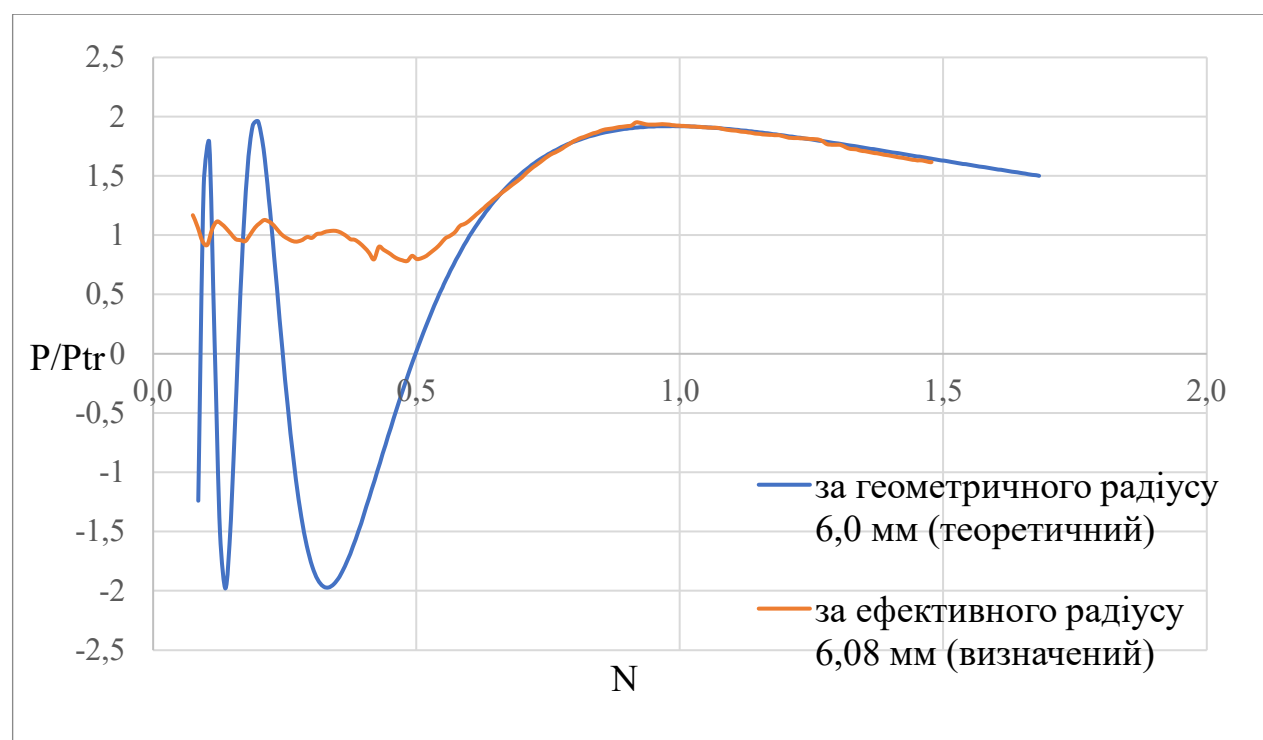


Рисунок 3.20 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е3512 на частоті 4МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 6,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 6,07 мм)

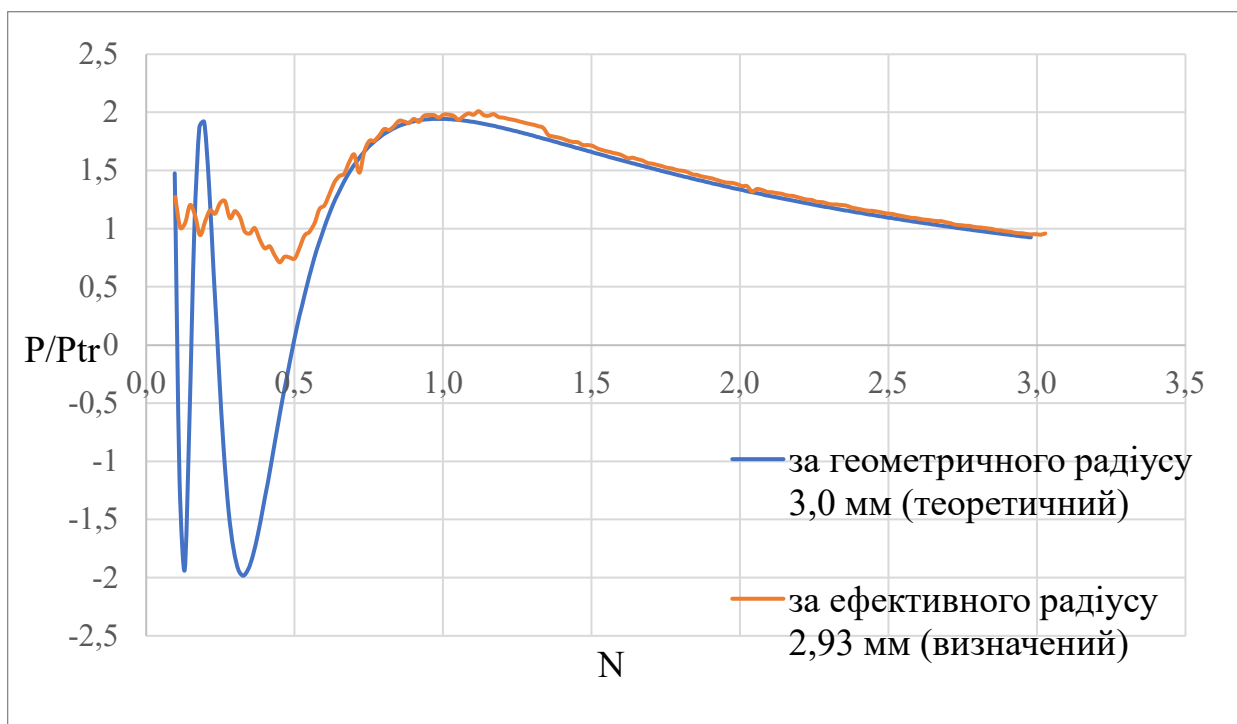


Рисунок 3.21 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е9906 на частоті 5МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 3,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 2,93 мм)

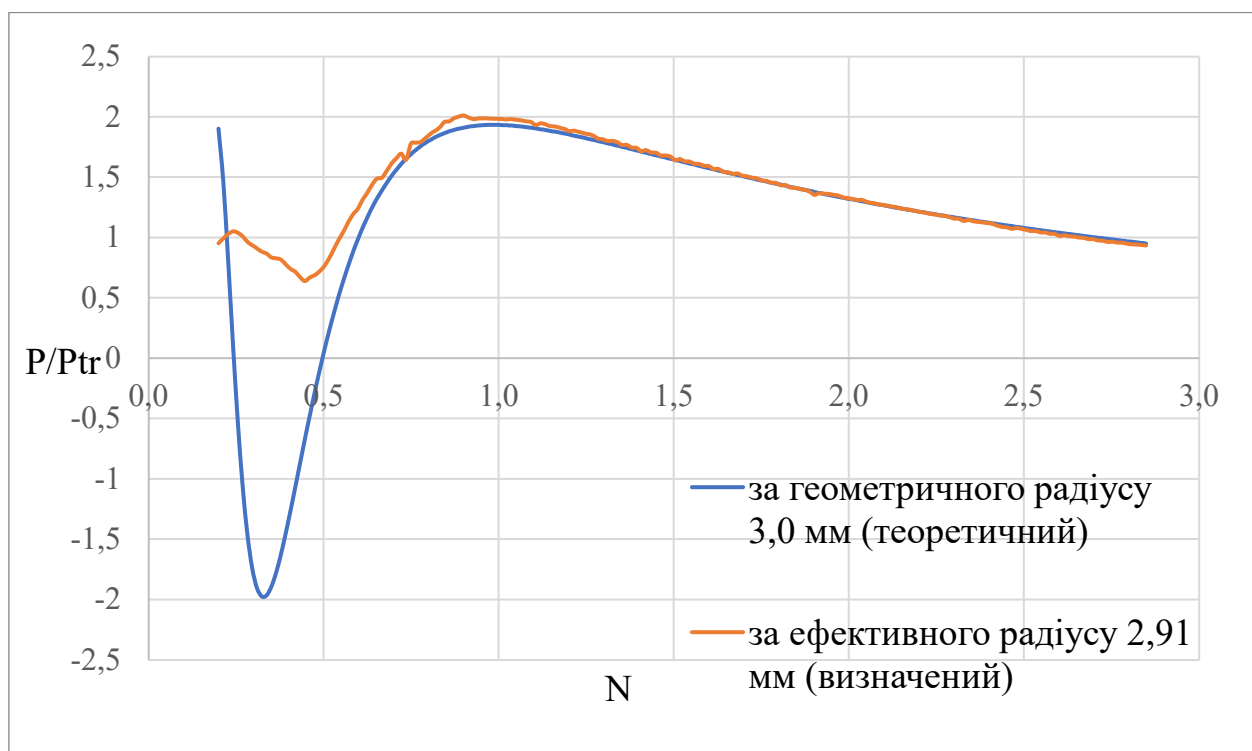


Рисунок 3.22 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е9906 на частоті 6МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 3,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 2,91 мм)

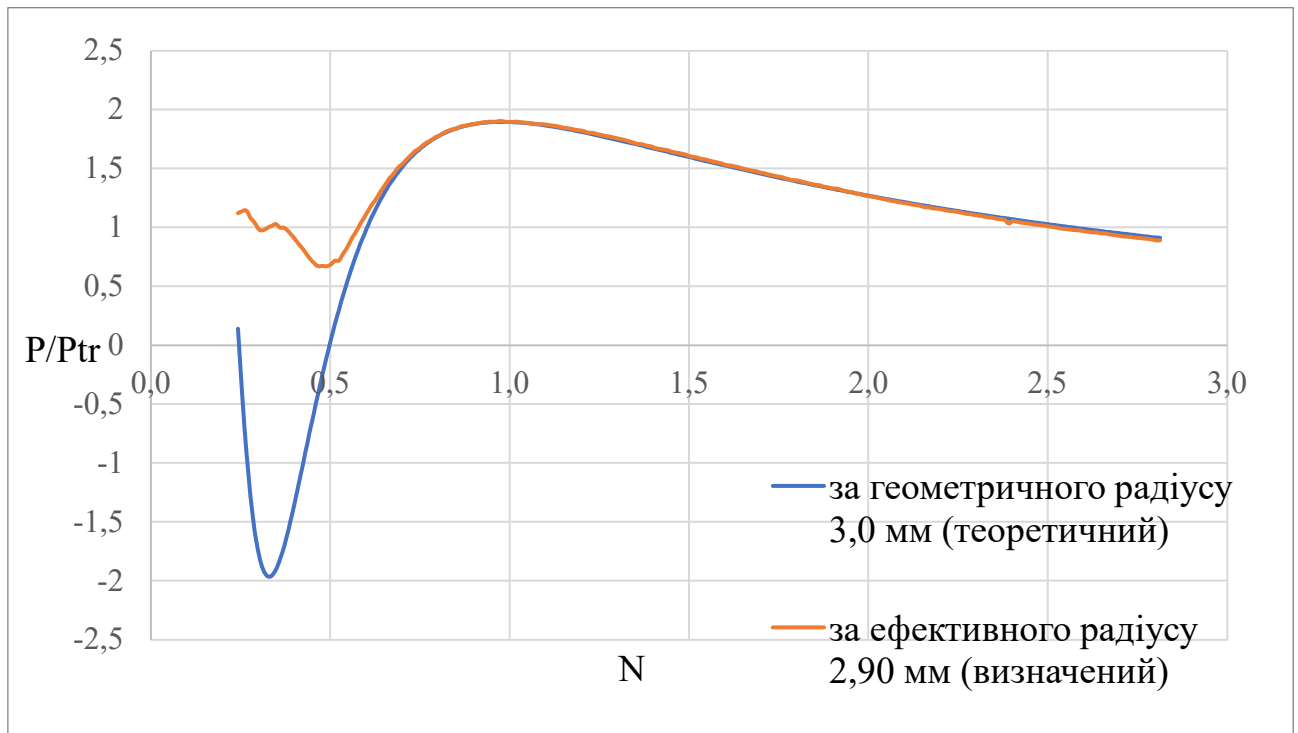


Рисунок 3.23 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е9906 на частоті 7МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 3,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 2,90 мм)

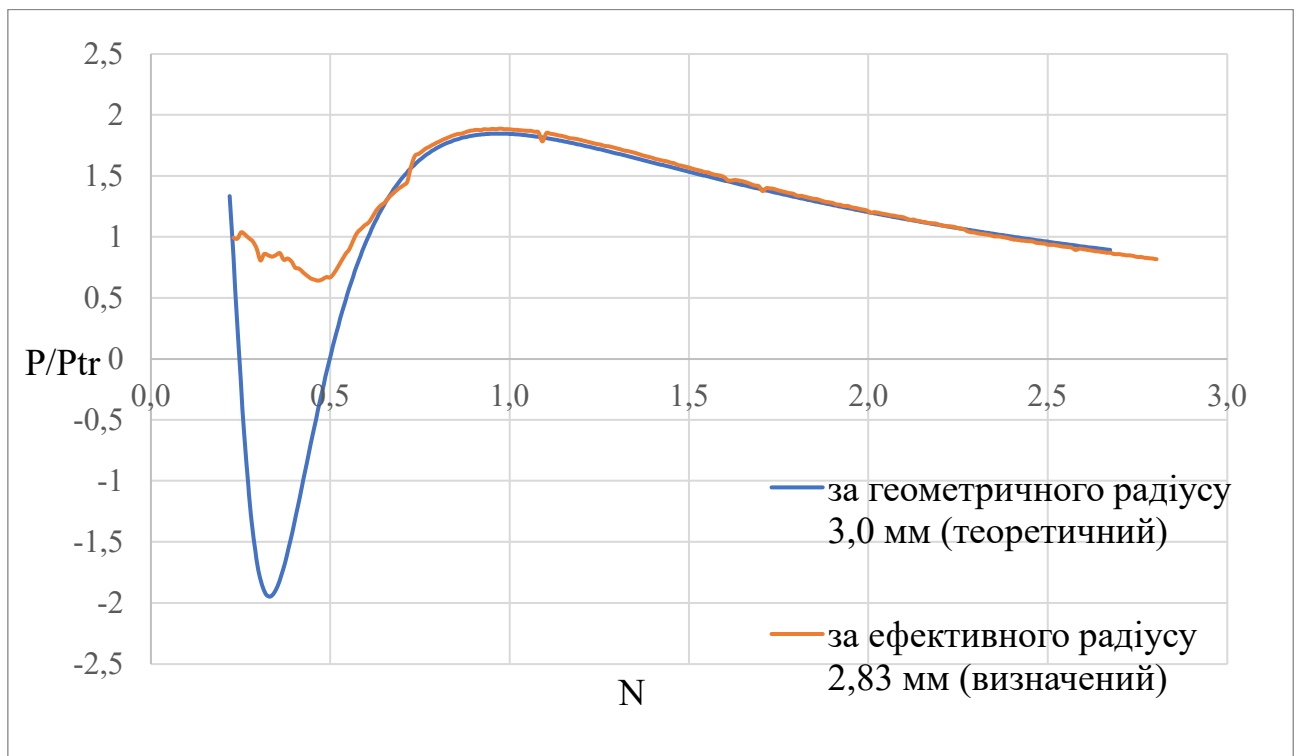


Рисунок 3.24 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е9906 на частоті 8МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 3,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 2,90 мм)

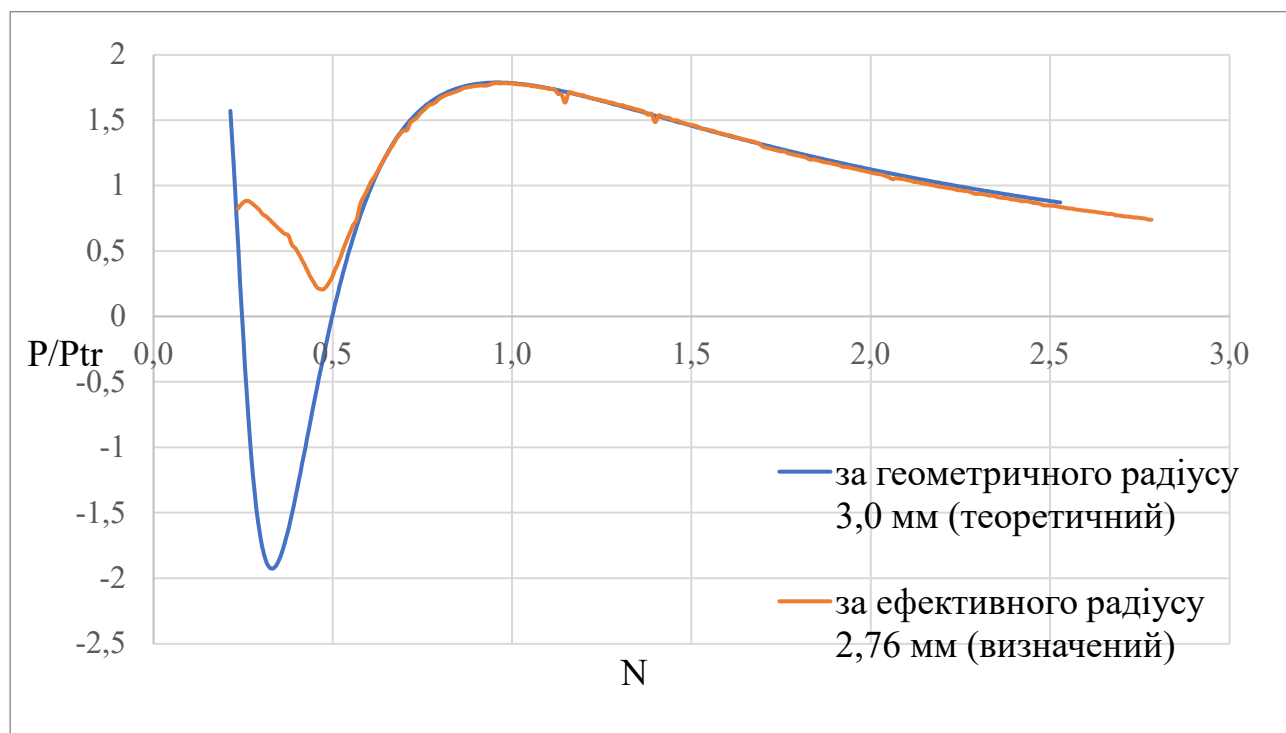


Рисунок 3.25 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е9906 на частоті 9МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 3,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 2,76 мм)

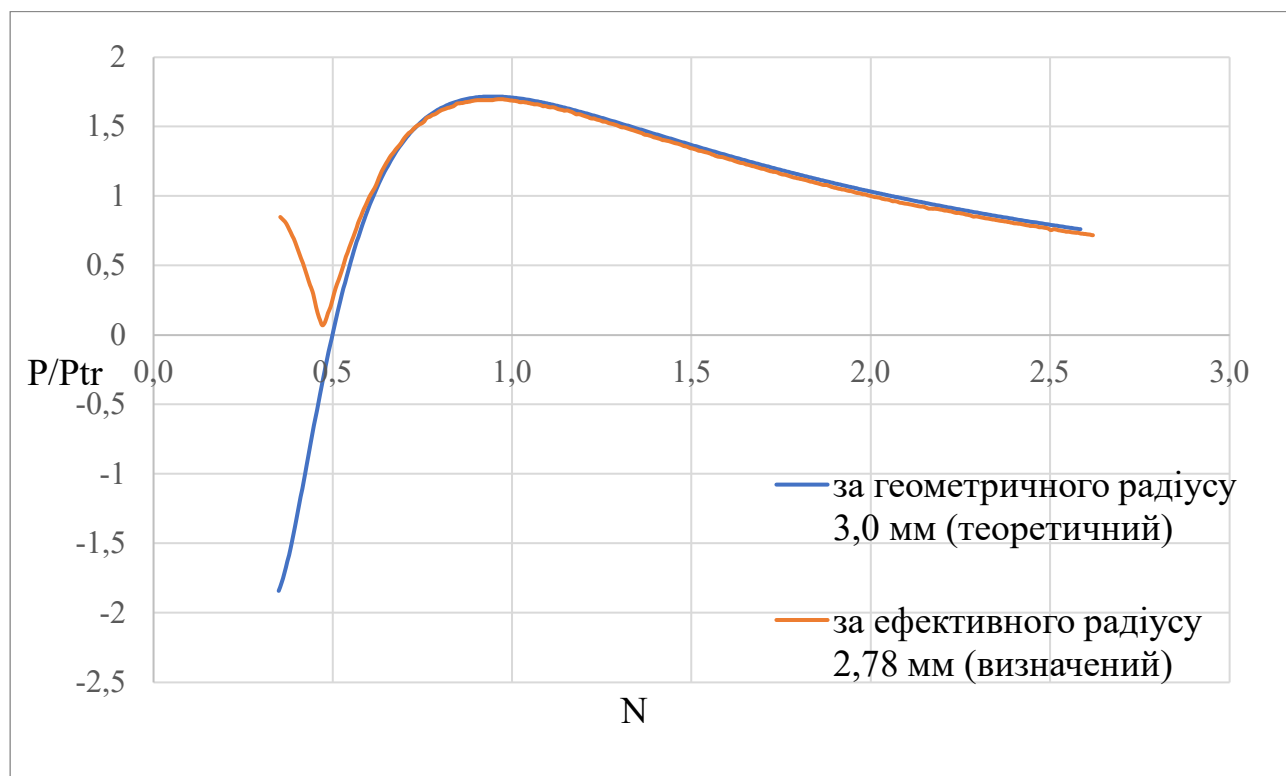


Рисунок 3.26 – Розподіл ультразвукового тиску УП Е9906 на частоті 10МГц визначений теоретично (геометричний радіус УП - 3,0 мм) та емпірично (ефективний радіус УП - 2,78 мм)

Отримані результати підтверджують необхідність визначення як ефективного радіуса УП, так і експериментального дослідження розподілу ультразвукового тиску для кожного окремого УП. Дослідження показали, що розподіл ультразвукового поля індивідуальний для кожного УП, і до умов вільного поля він наближається на відстані більшій ніж $1N$ для усіх досліджених УП, тобто за межею останнього максимуму ультразвукового тиску УП – де спад тиску з відстанню наближається до експоненційного закону. Тому, проводити визначення передавальної характеристики гідрофона за допомогою УП, зазначених у таблиці 2.1, треба на вимірювальній відстані більшій, ніж $1,2N$. Крім того, експериментальні дослідження розподілу ультразвукового тиску УП, показали, що протяжність ближнього поля N залежить від частоти та ефективного радіуса УП, і з ростом частоти (до 10 МГц) зменшується та наближається до $2N$.

3.4 Дослідження коефіцієнта шунтування $K_R(f)$

Під час вимірювання напруги $U_1(f)$, що створена на виході УП відбитим від рефлектора акустичним сигналом, електричне коло підсилювач потужності – УП не розривається, тому відбувається шунтування вихідним каскадом підсилювача потужності А150 внутрішнього імпедансу УП під час прийому сигналу, яке корегують за допомогою коефіцієнта шунтування $K_R(f)$.

Для перевірки застосування схеми вимірювання напруги відбитого сигналу (U_1), а також правильності визначення коефіцієнта шунтування $K_R(f)$ (2.11) під час визначення передавальної характеристики гідрофона (2.12), потрібно спочатку виміряти окремо імпеданс ультразвукового перетворювача та підсилювача потужності А150. Потім необхідно визначити загальний імпеданс ультразвуковий перетворювач - підсилювач потужності А150. Далі, на основі отриманих даних, визначити поправочний коефіцієнт K_{xx} , та порівняти його з коефіцієнтом шунтування $K_R(f)$ (2.11), який отримують експериментально шляхом вимірювання струму короткого замикання $I_{sc}(f)$ та струму збудження ультразвукового перетворювача $I_1(f)$.

Схема вимірювання струму збудження I_1 та напруги відбитого від рефлектора акустичного сигналу (U_1)

Схема вимірювання струму збудження УП I_1 та напруги відбитого від рефлектора акустичного сигналу U_1 показана на рисунку 3.27.

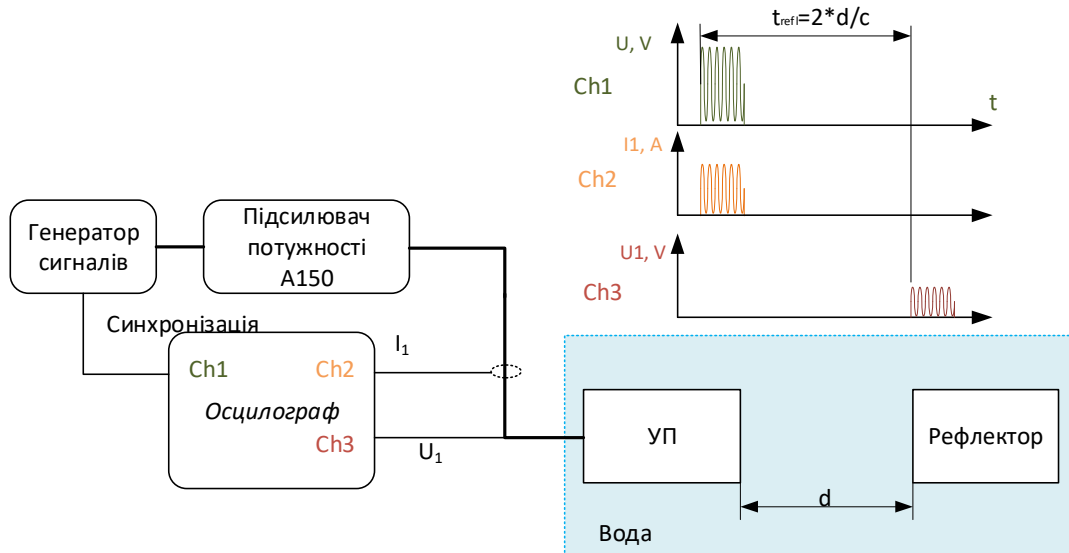


Рисунок 3.27 – Схема вимірювання струму збудження I_1 та напруги U_1

Під час генерування акустичного сигналу (I_1) (режим випромінювання) та прийому відбитого від рефлектора акустичного сигналу (U_1) (режим прийому) вимірювальне електричне коло не розмикається, відповідно сумарний імпеданс вимірювального кола є незмінним в режимі випромінювання та прийому акустичного сигналу.

Вимірювання змінного струму (I_1) під час генерування акустичного сигналу проводять безконтактним методом за допомогою струмового пробника, тому його вплив на сумарний імпеданс електричної схеми нехтовно малий.

Вимірювання напруги U_1 виконують на виході УП осцилографом з пробником ($R_{\text{вх}} = 10 \text{ МОм}$; $C_{\text{вх}} = 10 \text{ пФ}$). В ідеальному випадку, коли внутрішній опір УП $Z_{\text{trd}} = 0$, а опір вихідного каскаду ПП А150 в режимі прийому відбитого акустичного сигналу $Z_{\text{A150}} = \infty$, то виміряна напруга $U_1 = U_{\text{xx}}$, де U_{xx} – напруга холостого ходу УП. На практиці ситуація протилежна, напруга U_1 не рівна U_{xx} , оскільки внутрішній імпеданс УП не рівний нулю та залежить від частоти. Імпеданс вихідного каскаду ПП А150 також

залежить від частоти та наближається до нуля. З огляду на вищенаведене, пряме вимірювання напруги холостого ходу УП є неможливим.

На рисунку 3.28 зображена еквівалентна електрична схема під час вимірювання відбитого від рефлектора акустичного сигналу УП (U_1), що складається із з'єднання опорів: вихідного імпедансу ПП А150 (Z_{A150}) та власного імпедансу УП (Z_{trd}).

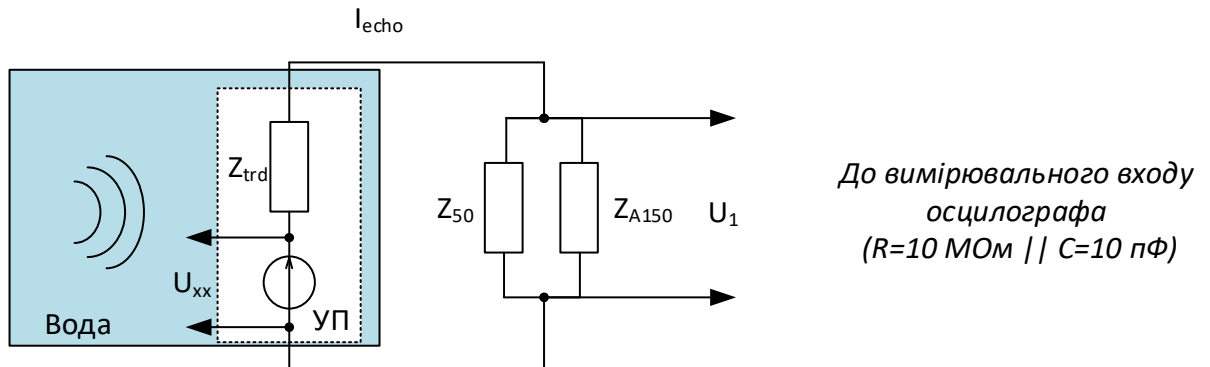


Рисунок 3.28 – Еквівалентна електрична схема вимірювання відбитого від рефлектора акустичного сигналу УП (U_1)

Згідно з рисунком 3.28 напруга холостого ходу U_{xx} рівна:

$$U_{xx} = I_{echo} \left(Z_{trd} + \frac{Z_{50} * Z_{A150}}{Z_{50} + Z_{A150}} \right). \quad (3.35)$$

Приймемо, що навантаження Z_{Load} :

$$Z_{Load} = \frac{Z_{50} * Z_{A150}}{Z_{50} + Z_{A150}}. \quad (3.36)$$

Тоді виміряна напруга відбитого акустичного сигналу УП (U_1) рівна:

$$U_1 = I_{echo} * Z_{Load}. \quad (3.37)$$

Оскільки струм I_{echo} є однаковим як для УП так і для навантаження, то можна записати:

$$\frac{U_{xx}}{(Z_{trd} + Z_{Load})} = I_{echo} = \frac{U_1}{Z_{Load}}. \quad (3.38)$$

Звідки U_{xx} дорівнює:

$$U_{xx} = \frac{U_1 * (Z_{trd} + Z_{Load})}{Z_{Load}}. \quad (3.39)$$

Отже, для коректного визначення напруги холостого ходу УП U_{xx} треба визначити імпеданс УП та імпеданс ПП А150 в діапазоні частот від 1,0 МГц до 10 МГц та визначити теоретичний поправочний коефіцієнт K_{xx} , який дорівнює:

$$K_{xx} = \frac{(Z_{trd} + Z_{Load})}{Z_{Load}}. \quad (3.40)$$

Вимірювання імпедансу УП Z_{trd}

Вимірювання імпедансу УП (таблиця 2.1) проведено за допомогою аналізатора типу BODE 100 фірми OMICRON LAB, який дозволяє виміряти такі параметри як: комплексну передавальну функцію, S-параметр, резонансну частоту, активний та реактивний опір у обраному діапазоні частот за допомогою частотної розгортки сигналу.

Для вимірювання імпедансу УП Z_{trd} , його попередньо занурили у воду та підключили до вимірювального виходу BODE 100, як показано на рисунку 3.29. Програмне забезпечення BODE 100 було налаштовано для проведення вимірювання активної та реактивної частини імпедансу випробовуваного УП в обраному діапазоні частот.

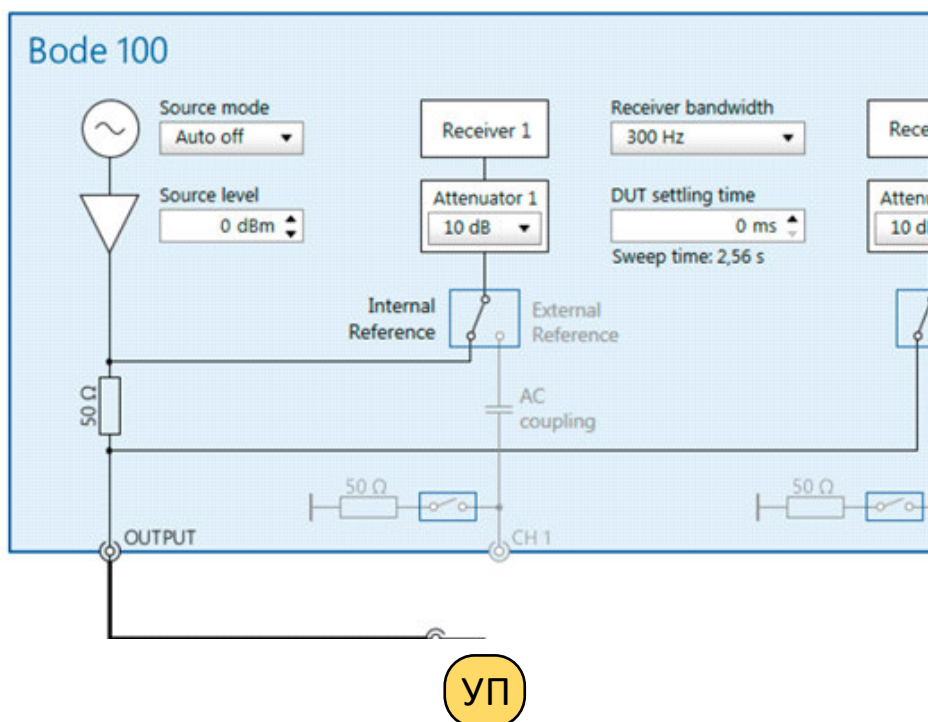


Рисунок 3.29 – Схема вимірювання імпедансу УП

Результати вимірювань імпедансу для комплекту УП (таблиця 2.1) подано на рисунках 3.30 – 3.33.

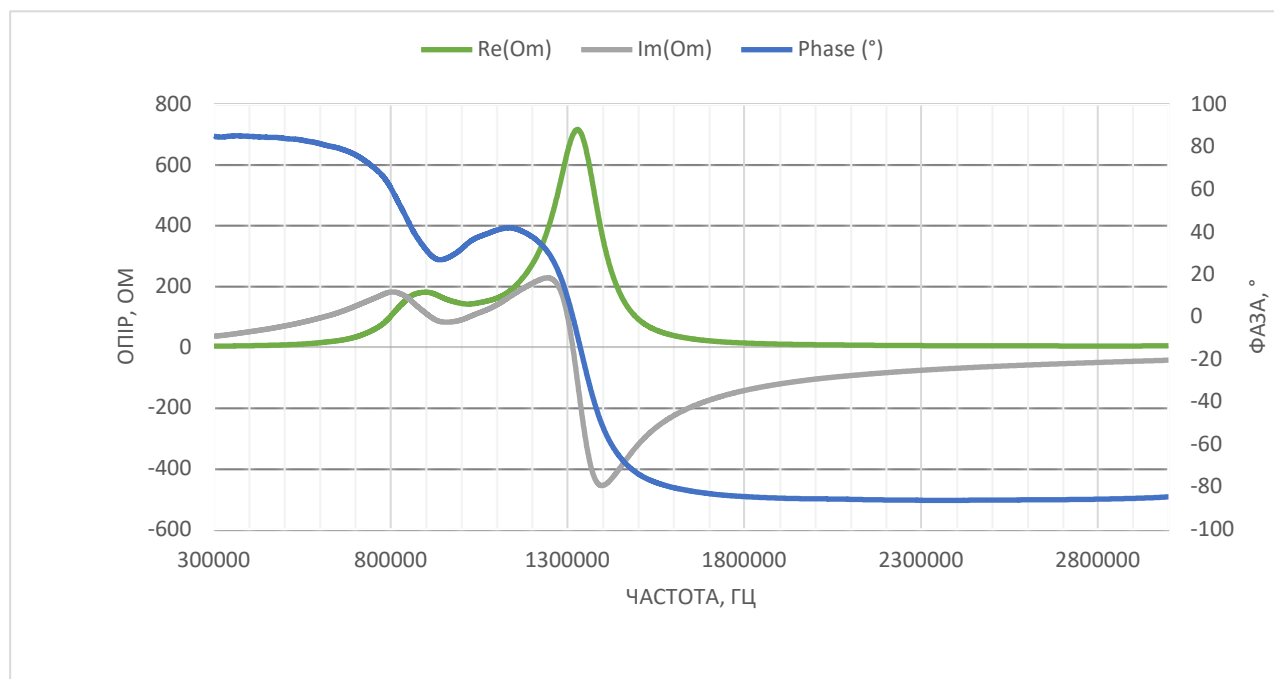


Рисунок 3.30 – Результати вимірювань активного, реактивного опору та фази в діапазоні частот від 0,3 до 3 МГц (УП Е1025)

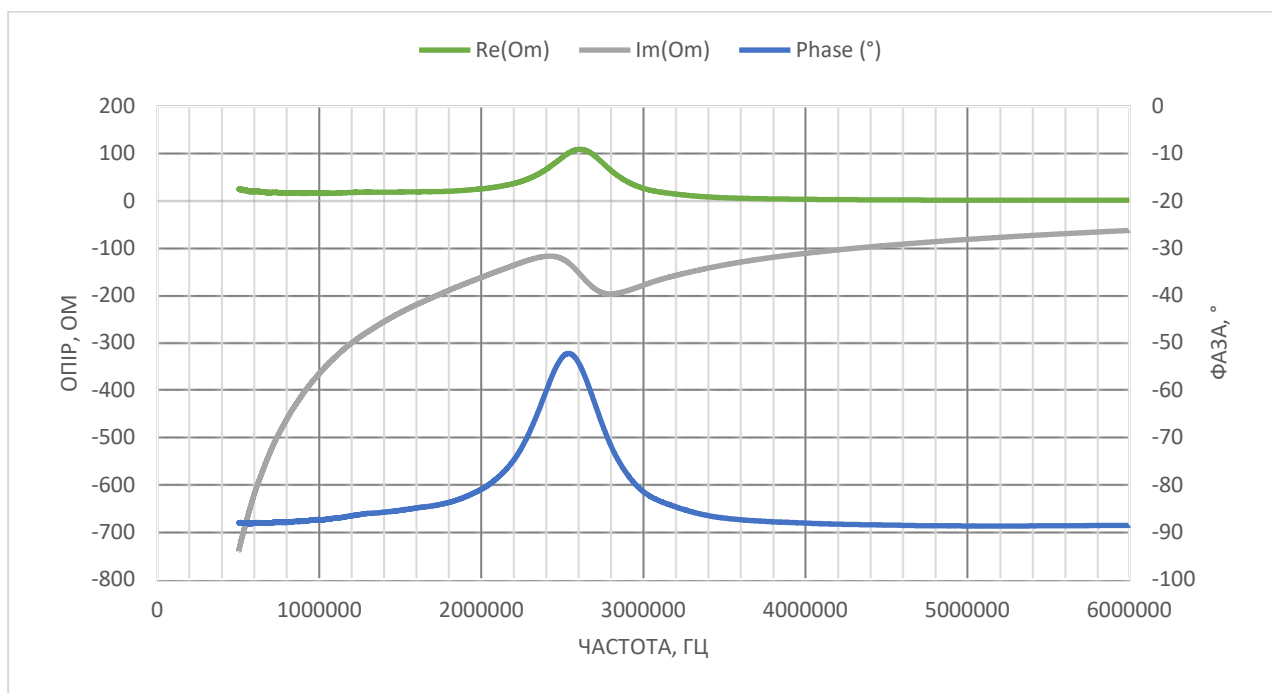


Рисунок 3.31 – Результати вимірювань активного, реактивного опору та фази в діапазоні частот від 0,5 до 6 МГц (УП E2312)

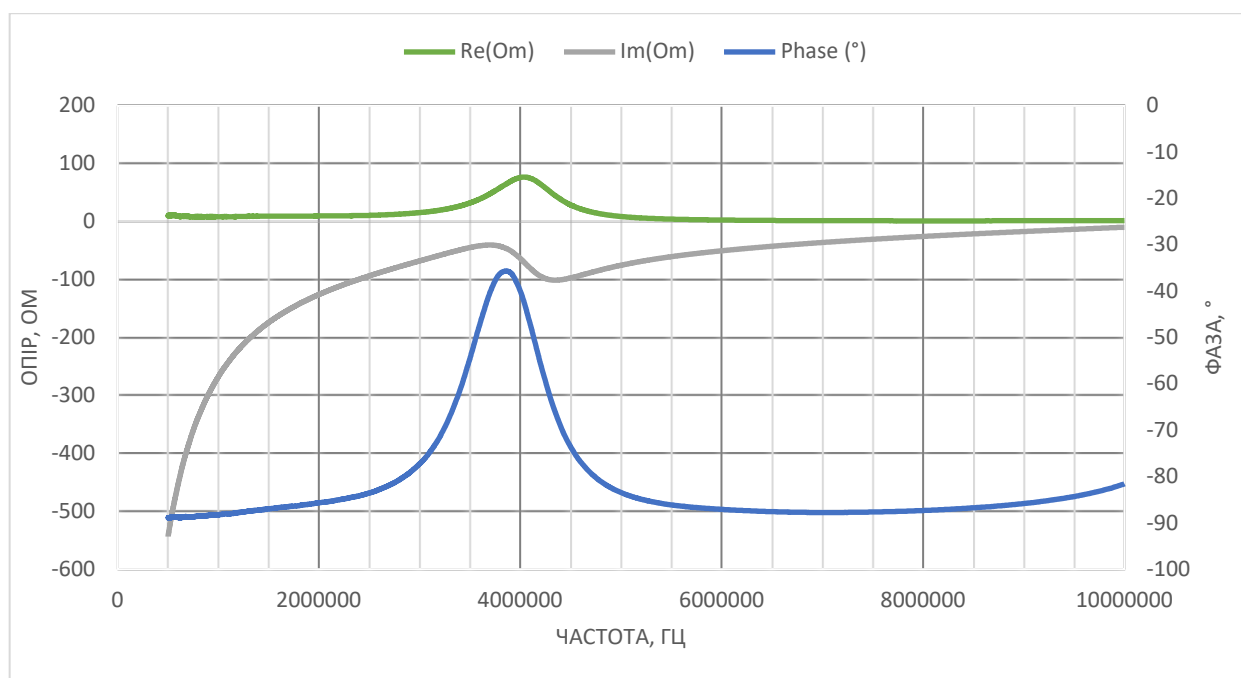


Рисунок 3.32 – Результати вимірювань активного, реактивного опору та фази в діапазоні частот від 0,5 до 10 МГц (УП E3512)

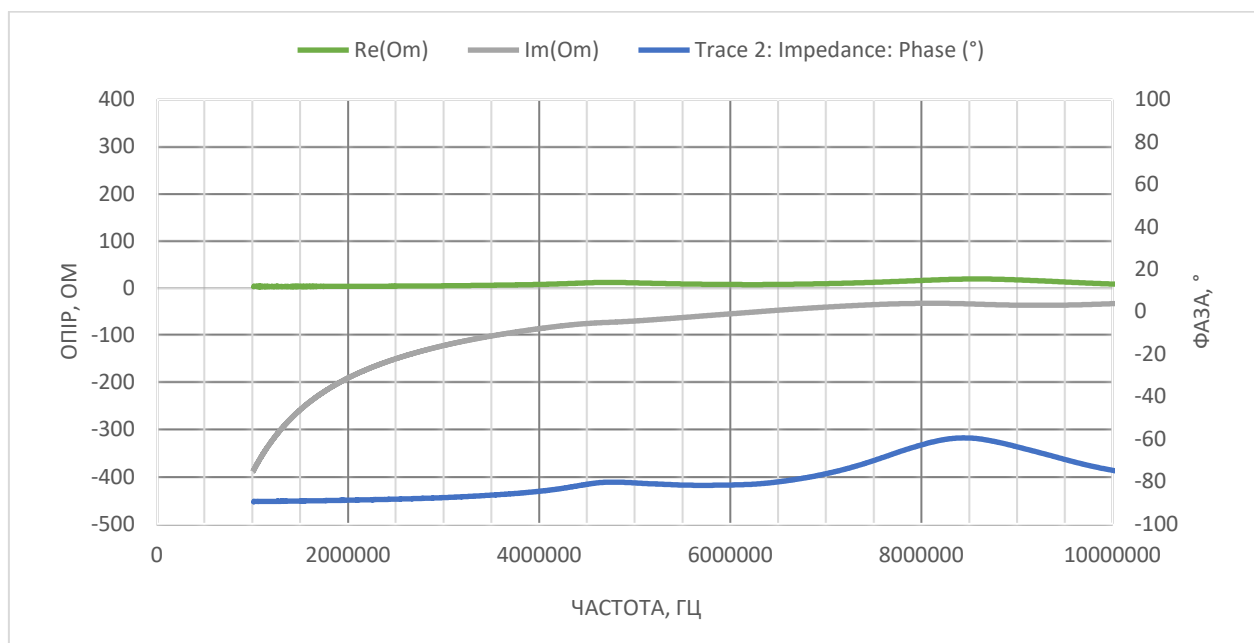


Рисунок 3.33 – Результати вимірювань активного, реактивного опору та фази в діапазоні частот від 1,0 до 10 МГц (УП Е9906)

У таблиці 3.10 наведено зведені результати вимірювання імпедансів для комплексу УП, на частотах, що відповідають їх застосуванню на еталоні НДЕТУ АUV-02-2018 під час калібрування гідрофона.

Таблиця 3.10 – Результати вимірювання імпедансу УП

Тип УП	Частота, МГц	Активний опір, Ом	Реактивний опір, Ом	Модуль комплексного опору (Z_{tr}), Ом	Фаза Z_{tr} , °
E1025	1	143,69	89,92	169,51	32,04
E2312	2	25,68	-161,46	163,49	-80,96
E3512	3	15,44	-67,81	69,55	-77,17
E3512	4	76,02	-64,03	99,40	-40,11
E9906	5	11,44	-69,42	70,35	-80,64
E9906	6	7,98	-54,34	54,93	-81,64
E9906	7	9,79	-39,89	41,07	-76,21
E9906	8	16,58	-32,05	36,09	-62,64
E9906	9	17,73	-35,90	40,04	-63,71
E9906	10	8,92	-32,65	33,85	-74,72

Вимірювання вихідного імпедансу підсилювача потужності А150 в режимі прийому акустичного сигналу

Вихідний каскад підсилювача потужності є активною електричною схемою підсилення, яка має активну та реактивну складову комплексного опору в

робочому діапазоні частот. Оскільки вихідний каскад ПП А150 не вимикають в режимі прийому відбитого від рефлектора акустичного сигналу, він є комплексним навантаженням для ультразвукового перетворювача в режимі прийому акустичного сигналу. Вимірювання імпедансу вихідного каскаду ПП А150 (Z_{A150}) проведено за допомогою аналізатора BODE 100 у режимі вимірювання активного та реактивного імпедансу у діапазоні частот (див. рисунок 3.34). Зведені результати вимірювання імпедансу ПП А150 для діапазону частот від 1 МГц до 10 МГц подано у таблиці 3.11, а у діапазоні частот від 100 кГц до 50 МГц наведено на рисунку 3.35.

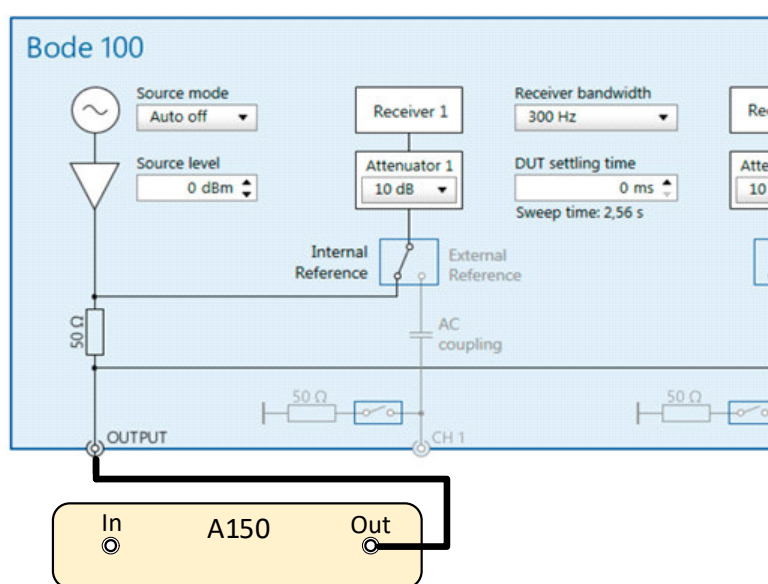


Рисунок 3.34 – Схема вимірювання імпедансу ПП А150

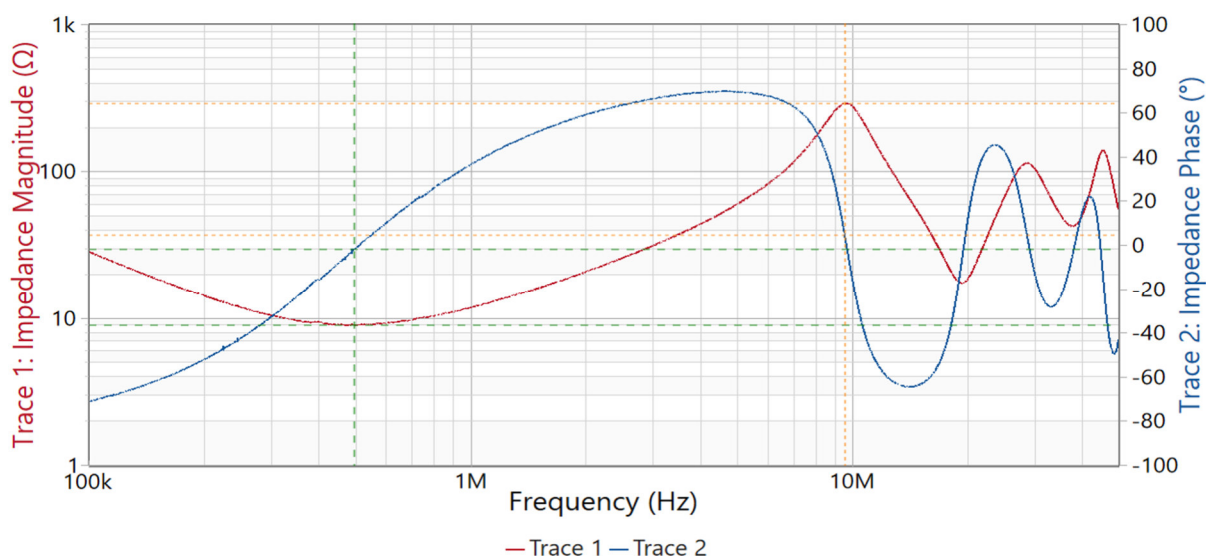


Рисунок 3.35 – Результати вимірювання імпедансу ПП А150 у діапазоні частот від 100 кГц до 50 МГц

Таблиця 3.11 – Результати вимірювання імпедансу ПП А150

Частота, МГц	Активний опір, Ом	Реактивний опір, Ом	Модуль комплексного опору (Z_{A150}), Ом	Фаза Z_{A150} , °
1	9,46	6,95	11,74	36,28
2	10,66	17,70	20,66	58,94
3	12,52	28,49	31,12	66,27
4	15,59	40,77	43,65	69,08
5	20,94	55,91	59,71	69,47
6	31,02	75,23	81,37	67,59
7	51,91	101,86	114,32	62,99
8	102,83	133,93	168,85	52,48
9	224,06	121,39	254,83	28,45
10	271,57	-66,97	279,70	-13,85

Результати розрахунку K_{xx}

Розрахунок теоретичного поправочного коефіцієнта K_{xx} проведено відповідно до формули (3.36) на основі вимірних даних та на частотах, які наведені у таблицях 3.10 і 3.11. Результати розрахунку K_{xx} подано у таблиці 3.12, де також наведено значення коефіцієнта шунтування $K_R(f)$ разом із його стандартним квадратичним відхилом, які визначені експериментально під час визначення передавальної характеристики гідрофонів.

Таблиця 3.12 – Результати розрахунку K_{xx}

Тип УП	Частота, МГц	Розрахований	Вимірний	
		K_{xx}	$K_r(f)$	СКВ (K_r), %
E1025	1	18,41	18,90	2,6
E2312	2	8,90	8,72	2,0
E3512	3	2,66	2,60	2,6
E3512	4	3,53	3,46	2,3
E9906	5	1,79	1,76	1,9
E9906	6	1,46	1,43	2,4
E9906	7	1,31	1,29	2,0
E9906	8	1,40	1,37	2,6
E9906	9	1,49	1,46	2,2
E9906	10	1,37	1,35	1,7

Як видно із результатів розрахунку коефіцієнта K_{xx} , його значення не співпадають із вимірними значеннями коефіцієнта шунтування $K_R(f)$, але

знаходяться у межах його стандартного відхилення $K_R(f)$. Це підтверджує правильність застосування коефіцієнта шунтування $K_R(f)$, як поправки до напруги $U_1(f)$ у математичній моделі передавальної характеристики гідрофона (2.12). Причиною нестабільності вимірюваного коефіцієнта шунтування $K_R(f)$ є температурний дрейф УП та ПП А150 під час тривалої роботи, оскільки вони не є прецизійними пристроями. Тому визначення коефіцієнта шунтування $K_R(f)$ необхідно проводити під час кожного вимірювання передавальної характеристики гідрофона.

Застосування поправки $K_R(f)$ (2.11) до напруги $U_1(f)$ у математичній моделі передавальної характеристики гідрофона (2.12), приведе до вилучення з неї параметру $I_1(f)$ - струму збудження УП. Отже, удосконалена математична модель передавальної характеристики гідрофона матиме вигляд [12]:

$$\begin{aligned} M_h(f) &= \frac{U_2(f)}{G_2} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}}{U_1(f) \cdot K_R(f)} \cdot \frac{2 \cdot A_{ER}}{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}} = \frac{U_2(f)}{G_2} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}}{U_1(f) \cdot \frac{I_{SC}(f)}{I_1(f)}} \cdot \frac{2 \cdot A_{ER}}{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}} = \\ &= \frac{U_2(f)}{G_2} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}}{U_1(f) \cdot I_{SC}(f)} \cdot \frac{2 \cdot A_{ER}}{\rho \cdot c}}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Застосовувати математичну модель (3.41) треба за умови, що струм збудження УП $I_1(f)$ на двох етапах калібрування (1 етап – калібрування УП методом самовзаємності та 2 етап – калібрування гідрофона) буде однаковим.

3.5 Висновок до розділу

За результатами досліджень отримано значення ефективних площ випромінювання допоміжних УП, які входять до складу еталона НДЕТУ-AUV-02-2018 на робочих частотах, та оцінена їх невизначеність. Отримані результати дали можливість перейти від застосування геометричної до ефективної площі УП у математичній моделі передавальної характеристики гідрофона, дозволили підвищити точність калібрування гідрофона на еталоні НДЕТУ-AUV-02-2018.

Результати дослідження коефіцієнтів дифракційних втрат показали узгодженість методик Фея та Бейснера, які можна застосовувати залежно від

доступних обчислювальних ресурсів. Визначено границю похибки для коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 (0,1%), що дозволило зменшити їхній внесок у сумарну стандартну невизначеність $u_c(M_h)$ передавальної характеристики гідрофона.

Результати дослідження ефективного радіуса УП показали, що він відрізняється від геометричного радіуса УП, залежить від частоти та впливає на вимірювальну відстань d , яка у свою чергу впливає на точність калібрування гідрофона. Оскільки вимірювальна відстань d залежить від ефективного радіуса УП, то оцінену сумарну стандартну невизначеність вимірювання ефективного радіуса УП необхідно враховувати як складову стандартної невизначеності вимірювальної відстані d при розрахунку бюджету невизначеності передавальної характеристики гідрофона.

Результати дослідження коефіцієнта шунтування $K_R(f)$ підтвердили правильність його застосування як поправки до значення вимірюної напруги $U_1(f)$ у математичній моделі передавальної характеристики гідрофона (2.12). Крім того, аналіз математичної моделі (2.12) показує, що струм збудження УП $I_1(f)$ не впливає на передавальну характеристику гідрофона M_h , а значення струму короткого замикання $I_{sc}(f)$ по суті є поправкою для вимірюного значення напруги $U_1(f)$, та демонструє, у скільки разів імпеданс вихідного каскаду підсилювача потужності є меншим від внутрішнього імпедансу ультразвукового перетворювача.

Застосування удосконаленої математичної моделі (3.41) дозволило виключити вплив на передавальну характеристику гідрофона струму збудження $I_1(f)$, стандартна невизначеність якого становить 1,73%, та зменшити сумарну стандартну невизначеність калібрування гідрофона на 0,2%. Отримані результати підтверджують коректність застосованого підходу та доцільність використання удосконаленої моделі, що сприятиме підвищенню точності калібрування гідрофонів.

4 ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ЕТАЛОНІ НДЕТУ AUV-02-2018

Апробацію результатів дослідження отриманих у розділі 3, а також обґрунтованість удосконаленої математичної моделі калібрування (3.41) проведено шляхом калібрування гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 (ДП НДІ «Система») та на еталоні НМІ Німеччини – Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), який має опубліковані СМС рядки у базі KCDB BIPM [66].

Калібрування проведено для гідрофонів:

– *голковий гідрофон діаметром 0,5 мм* – №2538, в діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц (у комплекті із попереднім підсилювачем PA15044 та блоком DC-Coupler DCPS559, фірми Precision Acoustics);

– *голковий гідрофон діаметром 1,0 мм* – №2515 в діапазоні частот від 1 МГц до 5 МГц;

– *мембранний гідрофон діаметром 1,0 мм* – типу МН-12 № МН12-111.65.23-042023 (у комплекті із підсилювачем та блоком живлення, фірми GAMPT) в діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц;

Отримані результати калібрування гідрофонів у РТВ (Німеччина) та ДП НДІ «Система» (Україна) були проаналізовані відповідно до вимог [67] з метою оцінки їх узгодженості.

4.1 Результати калібрування гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018

Калібрування гідрофонів проведено методом взаємності з двома перетворювачами, як описано у розділі 2.1. Для калібрування гідрофонів №2538, №2515 та МН-12 застосований комплект допоміжних УП з визначеними ефективними площами, які наведені у таблиці 3.4.

Параметри, які залежать від температури та частоти:

– ρ – густина води, кг/м^3 , розраховано згідно з (2.17);

– c – швидкість звуку у воді, м/с, розраховано згідно з (2.16);

– коефіцієнт згасання звуку у воді α , $\text{Гц}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$ – відповідно до (2.19).

Температуру води контролювали термометром типу CheckTemp 2 фірми Hanna.

Коефіцієнт відбивання рефлектора k розрахований відповідно до (2.18). Розрахунок коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 здійснено за допомогою програмного забезпечення «Calculation of P/P0» (рисунок 3.9).

Вимірювальну відстань d для УП на відповідній частоті розраховано з застосуванням ефективних радіусів УП, значення яких наведено у таблиці 3.7.

Перед початком вимірювань гідрофони замочували у дистильованій воді не менше ніж 1 годину. На кожній частоті дослідження гідрофона проведено серію з 10 незалежних вимірювань.

Результати вимірювання та розрахунку чутливості гідрофонів №2538, №2515 [12] та МН-12 на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 включно із невизначеністю подані у таблицях 4.1, 4.2 та 4.3 відповідно.

Таблиця 4.1 – Результати калібрування голкового гідрофона №2538

УП		E1025-SU	E-2312-SU	E-3512-SU	E-3512-SU	E9906-SM	E9906-SM	E9906-SM	E9906-SM	E9906-SM	E9906-SM
N		1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
F	МГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a_{ef}	М	0,012	0,00575	0,006021	0,006067	0,002975	0,002909	0,002899	0,002827	0,002753	0,002775
A_{ER}	м ²	36,7E-05	8,92E-05	10,4E-05	10,6E-05	2,39E-05	2,35E-05	2,35E-05	2,37E-05	2,32E-05	2,36E-05
ρ	кг/м ³	998,6	998,4	998,4	998,6	998,4	998,4	998,6	998,6	998,6	998,6
c	м/с	1476,1	1479,2	1479,2	1476,1	1479,2	1479,2	1476,1	1476,1	1476,1	1476,1
α		0,027	0,106	0,237	0,430	0,660	0,947	1,322	1,726	2,185	2,698
T	°C	18,2	18,6	18,7	18,1	18,7	18,8	18,0	18,0	18,0	18,0
U_1	В	0,377	0,164	0,658	0,829	0,668	0,796	0,702	0,601	0,341	0,146
K_R		18,79	8,68	2,57	3,41	1,76	1,42	1,28	1,37	1,46	1,34
I_{sc}	А	2,180	1,477	1,074	0,859	0,372	0,329	0,304	0,291	0,287	0,290
I_1	А	0,116	0,170	0,418	0,252	0,212	0,232	0,237	0,212	0,197	0,217
U_2	В	0,019	0,015	0,024	0,022	0,023	0,027	0,025	0,023	0,020	0,013
k		0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937
d	м	0,065	0,089	0,147	0,199	0,060	0,069	0,080	0,087	0,092	0,104
t	мкс	44,3	60,4	99,4	135,2	40,5	46,4	54,0	58,7	62,6	70,7
G_1		0,812	0,753	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752
G_2		1,997	1,411	1,413	1,416	1,389	1,388	1,388	1,387	1,374	1,375
$M_h(f)$	мВ/МПа	198,6	202,1	194,1	179,8	153,5	171,4	171,7	177,9	194,0	183,8
$u_a(M_h)$	%	2,2	1,6	1,8	1,2	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,4
$u_b(M_h)$	%	2,60	2,65	2,69	2,71	2,63	2,60	2,63	2,65	2,63	2,83
$u_c(M_h)$	%	3,41	3,10	3,23	2,95	3,47	3,33	3,23	3,21	3,08	3,16
$U(k=2.26)$	%	7,72	7,02	7,31	6,68	7,86	7,53	7,30	7,28	6,98	7,15

Таблиця 4.2 – Результати калібрування голкового гідрофона №2515

УП		E-1025-SU	E-2312-SU	E-3512-SU	E-3512-SU	E9906-SM
N		1,0	2,0	2,0	2,0	2,0
F	МГц	1	2	3	4	5
a _{ef}	М	0,012	0,00575	0,006021	0,006067	0,002975
A _{ER}	м ²	36,7E-05	8,92E-05	10,4E-05	10,6E-05	2,39E-05
ρ	кг/м ³	998,45	998,58	998,11	998,11	998,58
c	м/с	1479,2	1476,1	1482,4	1482,4	1476,1
α		0,02639	0,10655	0,23168	0,40936	0,66595
T	°C	18,7	18,4	19,5	19,7	18,4
U ₁	B	0,369	0,164	0,656	0,804	0,67
K _R		18,160	8,698	2,565	3,344	1,763
I _{sc}	A	2,27	1,47	1,08	0,866	0,372
I ₁	A	0,125	0,169	0,421	0,259	0,211
U ₂	B	0,0781	0,052	0,07590	0,0721	0,0902
k		0,9369	0,9369	0,9369	0,9369	0,9369
d	м	0,0652	0,08959	0,14673	0,19864	0,05998
t	мкс	44,2	60,7	99,0	134,0	40,6
G ₁		0,8090	0,7529	0,7522	0,7520	0,7524
G ₂		1,9938	1,4065	1,4082	1,4090	1,3895
M_h(f)	мВ/МПа	827,4	692,4	623,1	590,4	609,0
ua(M)	%	2,8	2,3	2,0	3,0	2,3
ub(M)	%	2,60	2,65	2,69	2,71	2,63
uc(M)	%	3,82	3,51	3,35	4,07	3,48
U (k=2.26)	%	8,64	7,94	7,59	9,20	7,87

Таблиця 4.3 – Результати калібрування мембранного гідрофона МН-12

УП		E1025-SU	E-2312-SU	E-3512-SU	E-3512-SU	E9906-SM	E9906-SM	E9906-SM	E9906-SM	E9906-SM	E9906-SM
N		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
F	МГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a _{ef}	М	0,012	0,00575	0,006021	0,006067	0,002975	0,002909	0,002899	0,002827	0,002753	0,002775
A _{ER}	м ²	36,7E-05	8,92E-05	10,4E-05	10,6E-05	2,39E-05	2,35E-05	2,35E-05	2,37E-05	2,32E-05	2,36E-05
ρ	кг/м ³	998,45	998,45	998,45	998,45	998,45	998,45	998,45	998,45	998,45	998,45
c	м/с	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2	1479,2
α		0,02606	0,10425	0,23456	0,41700	0,65156	0,93825	1,27706	1,66799	2,11105	2,60624
T	°C	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
U ₁	B	0,396	0,164	0,658	0,829	0,676	0,8	0,702	0,602	0,344	0,145
K _R		19,153	8,970	2,647	3,603	1,818	1,477	1,335	1,372	1,519	1,395
I _{sc}	A	2,26	1,48	1,08	0,861	0,369	0,325	0,299	0,2840	0,278	0,2790
I ₁	A	0,118	0,165	0,408	0,239	0,203	0,22	0,224	0,2	0,183	0,2
U ₂	B	0,00514	0,0059	0,00904	0,00882	0,0105	0,0109	0,0097	0,0092	0,00762	0,00500
k		0,9369	0,9369	0,9369	0,9369	0,9369	0,9369	0,9369	0,9369	0,9369	0,9369
d	м	0,19470	0,08941	0,14705	0,19907	0,05985	0,06865	0,07954	0,08645	0,09223	0,10412
t	мкс	131,63	60,44	99,41	134,58	40,46	46,41	53,77	58,44	62,35	70,39
G ₁		0,7528	0,7529	0,7522	0,7520	0,7524	0,7522	0,7521	0,7520	0,7521	0,7519
G ₂		1,4116	1,4079	1,4063	1,408	1,39	1,3881	1,388	1,3879	1,3854	1,3859
M_h(f)	мВ/МПа	71,8	78,2	74,7	71,4	70,8	70,6	68,8	72,2	75,9	74,3
ua(M _h)	%	3,1	2,8	2,8	2,8	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	3,0
ub(M _h)	%	2,39	2,67	2,48	2,49	2,44	2,43	2,42	2,46	2,37	2,63
uc(M _h)	%	3,91	3,87	3,74	3,75	3,64	3,70	3,70	3,72	3,75	3,99
U(k=2.26)	%	8,85	8,75	8,47	8,47	8,23	8,38	8,38	8,42	8,47	9,02

Згідно з обраною математичною моделлю калібрування (3.41) складено бюджет невизначеності відповідно до ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [52]. Приклад розрахунку бюджету невизначеності для гідрофона МН-12, на частоті 1 МГц наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Бюджет невизначеності передавальної характеристики гідрофона МН-12

	Джерело невизначеності	Границі похибки, %	Закон розподілу	Стандартна невизначеність, %	Коефіцієнт чутливості	Внесок, %
1	Напруга на виході УП $U_1(f)$	3,0	прямокутний	1,73	0,5	0,87
2	Напруга на виході гідрофона $U_2(f)$	3,0	прямокутний	1,73	1	1,73
3	Струм закоротки $I_{SC}(f)$	3,0	прямокутний	1,73	0,5	0,87
4	Ефективна площа УП, A_{ER}	3,5	нормальний	1,75	0,5	0,88
5	Густина води ρ	0,004	прямокутний	0,002	0,5	0,001
6	Швидкість звуку c	0,1	прямокутний	0,06	0,5	0,03
7	Коефіцієнт відбивання k	0,2	прямокутний	0,12	0,5	0,06
8	Поправка G_1	0,1	прямокутний	0,06	0,5	0,03
9	Поправка G_2	0,1	прямокутний	0,06	1	0,06
10	Коефіцієнт загасання $e^{-\alpha}$	0,63	прямокутний	0,36	0,5	0,18
11	Вимірювальна відстань e^d	2,5	нормальний	1,25	0,5	0,63
Сумарна невизначеність за типом В, $u_B(M_h)$, %						2,39
Сумарна невизначеність за типом А, $u_A(M_h)$, % (за результатами 10 спостережень)						3,10
Сумарна стандартна невизначеність, $u_C(M_h)$, %						3,91
Розширена невизначеність (за коефіцієнта розширення $k=2.262$, $P=0.95$), U , %						8,85

4.2 Метод та результати калібрування гідрофонів у РТВ

Гідрофони №2538, №2515 та МН-12 калібрували методом порівняння відповідно до стандарту ІЕС 62127-2 за допомогою опорних гідрофонів РТВ із застосуванням методу спектрометрії з часовою затримкою (TDS). Для калібрування використовували опорні гідрофони типу PVDF з активним діаметром 1 мм та 0,5 мм відповідно. Опорні гідрофони були попередньо калібровані первинним інтерферометричним методом згідно з Додатком F ІЕС 62127-2.

Перед початком вимірювань гідрофони витримали у воді впродовж 4 годин. Опорний гідрофон розмістили в дальньому полі плоского круглого ультразвукового перетворювача, який збуджували безперервним радіочастотним сигналом. Частоту сигналу змінювали за допомогою розгортки в діапазоні від

1 МГц до 10 МГц. Сигнал з гідрофона подавався на попередній підсилювач PA15044 - блок DC-Coupler DCPS559 - навантаження 50 Ом, а вихідну напругу реєстрували за допомогою аналізатора спектра. Перед початком вимірювання площину гідрофона встановлювали перпендикулярно до осі поширення звуку за допомогою методу ехо-імпульсного відлуння, знаходженням максимального звукового тиску шляхом спостереження за вихідним сигналом з гідрофона на частоті 10 МГц. Після чого вимірювали та зберігали на комп'ютері вихідний сигнал опорного гідрофона за частотної розгортки від 1 МГц до 10 МГц з кроком 20 кГц.

Далі опорний гідрофон замінили на калібрований, розмістили у ту ж точку вимірювання, провели його вирівнювання та вимірювання за процедурами, які застосовували для опорного гідрофона.

Після цього провели розрахунок чутливості гідрофона за допомогою комп'ютера, з врахуванням частото-залежних корегувальних коефіцієнтів на просторове усереднення, розрахованих з урахуванням номінального діаметра каліброваного гідрофона, і ефективного діаметра опорного гідрофона, отриманого на основі вимірювань діаграми його спрямованості.

Результати калібрування гідрофонів №2538, №2515 та МН-12 та відповідні значення розширеної невизначеності подано у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати калібрування гідрофонів №2538, №2515 та МН-12 у РТВ (Німеччина)

Гідрофон	№2538		№2515		МН-12	
Частота, МГц	Рівень чутливості, мВ/МПа	U (k=2, P=0.95), %	Рівень чутливості, мВ/МПа	U (k=2, P=0.95), %	Рівень чутливості, мВ/МПа	U (k=2, P=0.95), %
1	208,56	10,54	873,61	10,54	85,11	16,8
2	212,72	10,54	707,95	10,54	81,28	10,9
3	200,60	10,25	653,87	10,25	77,62	10,9
4	183,65	10,25	615,19	10,25	75,86	10,9
5	158,46	10,25	661,24	10,25	74,13	10,9
6	171,62	10,23			74,13	10,8
7	174,76	10,23			72,86	10,8
8	177,38	10,23			72,86	10,8
9	184,25	10,23			72,44	10,8
10	187,58	10,23			71,61	10,8

4.3 Верифікація отриманих результатів калібрування

Зведені результати калібрування (включно з розширеними невизначеностями) гідрофонів №2538, №2515 та МН-12 у ДП НДІ «Система» (Україна) та РТВ (Німеччина) подано на рисунках 4.1, 4.2 та 4.3, відповідно.

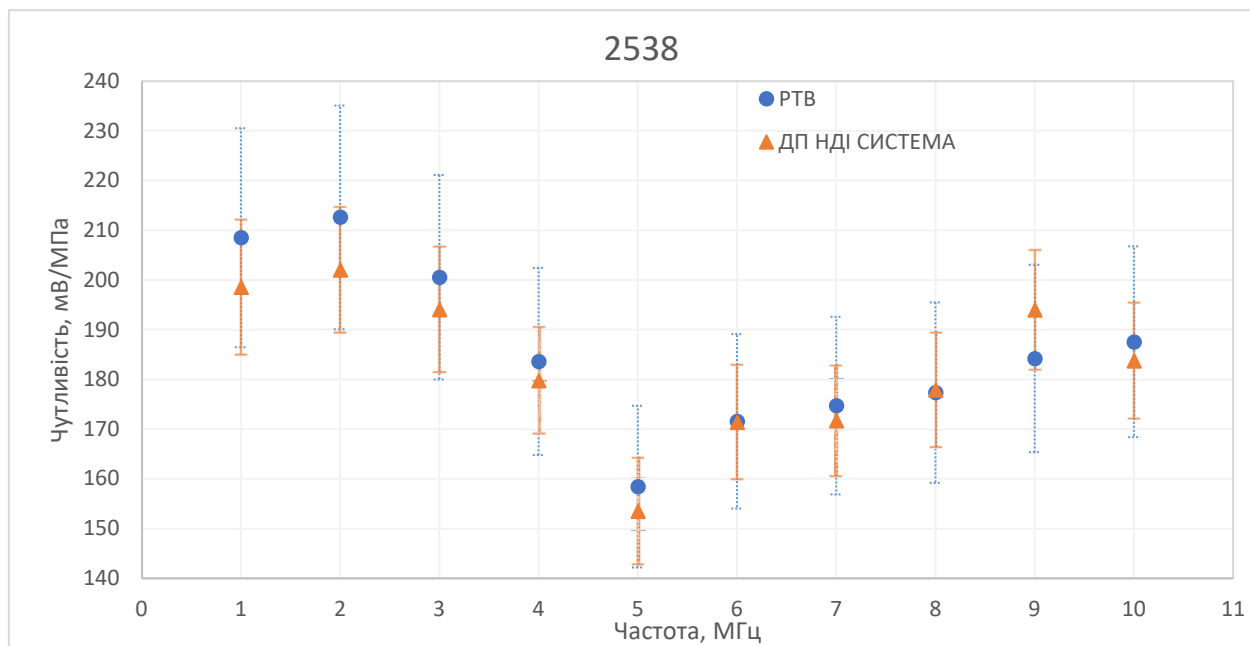


Рисунок 4.1 – Результати калібрування голкового гідрофона №2538 (0,5 мм) з невизначеністю в НМІ РТВ (Німеччина) та в ДП НДІ «Система» (Україна)

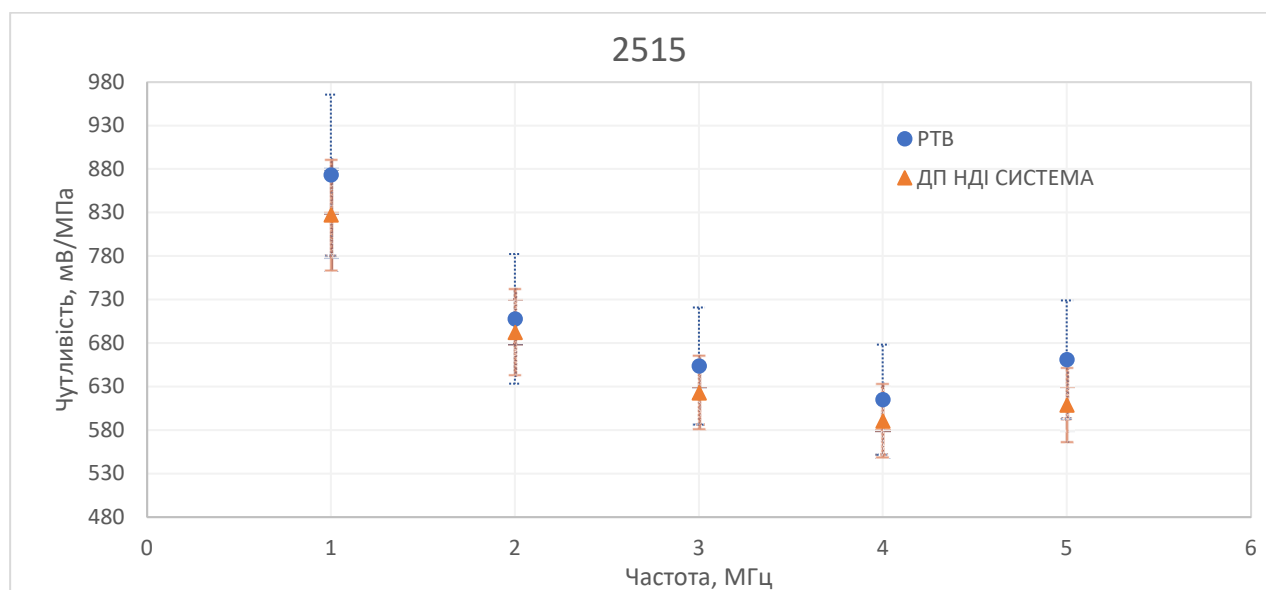


Рисунок 4.2 – Результати калібрування голкового гідрофона №2515 (1,0 мм) з невизначеністю в НМІ РТВ (Німеччина) та у ДП НДІ «Система» (Україна)

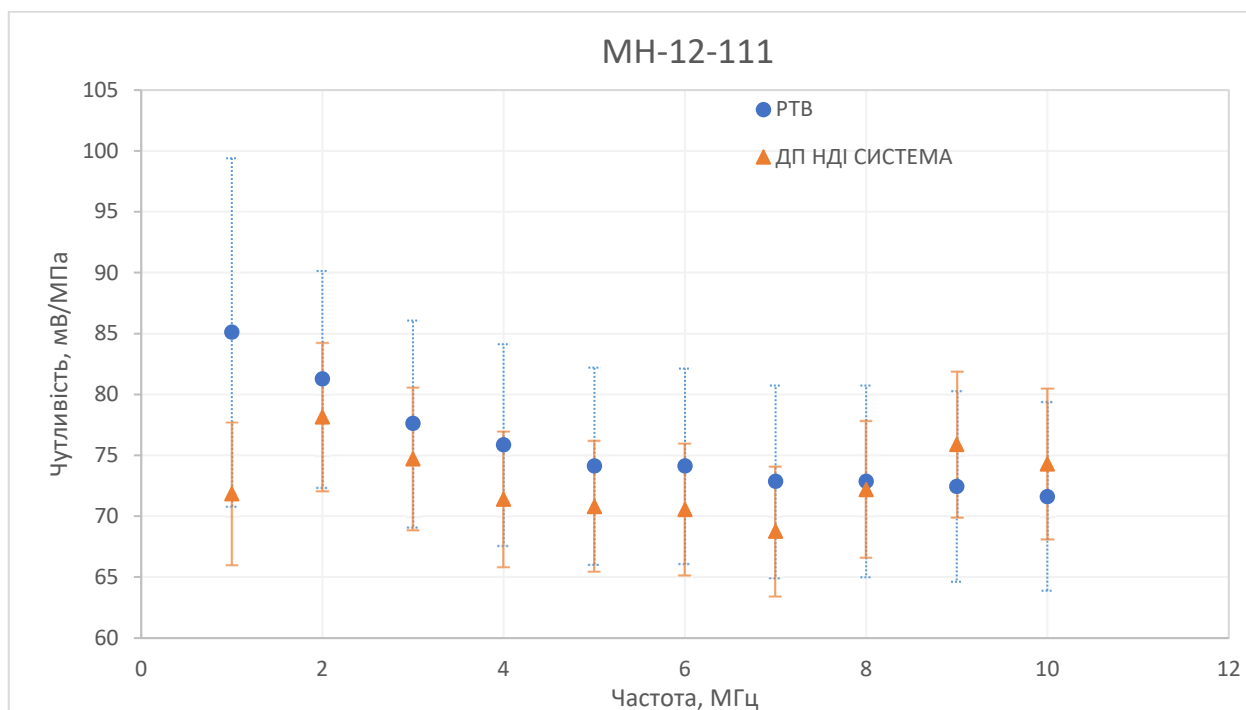


Рисунок 4.3 – Результати калібрування мембранного гідрофона МН-12 (1,0 мм) з невизначеністю в НМІ РТВ (Німеччина) та у ДП НДІ «Система» (Україна)

Для оцінки результатів калібрування гідрофонів розраховане опорне значення вимірювань x_{ref} відповідно до формули [67]:

$$x_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{u^2(x_i)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u^2(x_i)}}, \quad (4.1)$$

де: x_i – результати калібрування гідрофонів, надані лабораторіями (НМІ);

n – кількість калібрувальних лабораторій;

$u(x_i)$ – стандартні невизначеності, надані калібрувальними лабораторіями.

Стандартна невизначеність опорного значення $u(x_{ref})$ розрахована за формулою [67]:

$$u(x_{ref}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u^2(x_i)}}}. \quad (4.2)$$

За результатами калібрувань та відповідних стандартних невизначеностей $x_i, u(x_i)$ розраховані значення критерію χ^2 за формулою [67]:

$$\chi^2 = \sum_1^n \frac{(x_i - x_{ref})^2}{u^2(x_i)} . \quad (4.3)$$

Якщо значення критерію, яке розраховане відповідно до наданих даних НМІ, не є більшим ніж критичне значення критерію χ^2 , розраховане для рівня довіри $P = 0.95$ та кількості ступенів свободи $n - 1$ [67], тобто

$$\chi^2 < \chi_{0.95}^2(n - 1) , \quad (4.4)$$

то результати калібрування гідрофонів лабораторіями вважають узгодженими.

Для результатів калібрування, які увійшли у множину узгоджених даних і використовуються для обчислення опорного значення, застосовано таку процедуру верифікації даних: якщо для результату калібрування x , із стандартною невизначеністю $u(x)$ виконується умова [67]:

$$E_n = \frac{|x - x_{ref}|}{2 \cdot \sqrt{u^2(x) - u^2(x_{ref})}} < 1 , \quad (4.5)$$

то стандартна невизначеність, яка заявлена лабораторією НМІ становить:

$$u(\text{comparison}) = u(x) . \quad (4.6)$$

Якщо для результату калібрування x , із стандартною невизначеністю $u(x)$ умова (4.5) не виконується, тоді мінімальну стандартну невизначеність, заявлену лабораторією НМІ, треба збільшити згідно з [67]:

$$u(\text{comparison}) = \sqrt{\frac{(x - x_{ref})^2}{4} + u^2(x_{ref})} . \quad (4.7)$$

Відповідно розширена невизначеність становить [67]:

$$U_{0.95}(\text{comparison}) = 2 \cdot u(\text{comparison}) . \quad (4.8)$$

Результати верифікації результатів калібрування для гідрофонів №2515, 2538 та МН-12 подані у таблиці 4.6, 4.7 та 4.8 відповідно.

Таблиця 4.6 – Голковий гідрофон №2515

	ДП НДІ «Система»		РТВ		X_{ref}	$u(x_{ref})$			
Частота, МГц	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	χ^2	$\chi^2_{0.95}(n-1)$	E_n
1	827,41	31,61	873,61	46,04	842,2	26,06	0,68	3,84	0,41
2	692,42	24,32	707,95	37,31	697,1	20,37	0,12	3,84	0,17
3	623,11	20,91	653,87	33,51	631,7	17,74	0,61	3,84	0,39
4	590,41	20,91	615,19	31,53	598,0	17,42	0,43	3,84	0,33
5	609,04	21,18	661,24	33,89	623,7	17,96	1,71	3,84	0,65

Таблиця 4.7 – Голковий гідрофон №2538

	ДП НДІ «Система»		РТВ		X_{ref}	$u(x_{ref})$			
Частота, МГц	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	χ^2	$\chi^2_{0.95}(n-1)$	E_n
1	198,59	6,78	208,56	10,99	203,1	5,77	0,60	3,84	0,39
2	202,09	6,27	212,72	11,21	204,6	5,47	0,69	3,84	0,41
3	194,07	6,27	200,6	10,28	195,8	5,35	0,29	3,84	0,27
4	179,81	5,31	183,65	9,41	180,7	4,62	0,13	3,84	0,18
5	153,51	5,33	158,46	8,12	155,0	4,46	0,26	3,84	0,25
6	171,44	5,71	171,62	8,78	171,5	4,78	0,00	3,84	0,01
7	171,72	5,54	174,76	8,94	172,6	4,71	0,08	3,84	0,14
8	177,90	5,72	177,38	9,07	177,8	4,84	0,00	3,84	0,02
9	194,02	5,98	184,25	9,42	191,2	5,05	0,77	3,84	0,44
10	183,78	5,81	187,58	9,59	184,8	4,97	0,11	3,84	0,17

Таблиця 4.8 – Мембранний гідрофон МН-12

	ДП НДІ «Система»		РТВ		X_{ref}	$u(x_{ref})$			
Частота, МГц	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	$M_h(f)$, мВ/МПа	u_c , мВ/МПа	χ^2	$\chi^2_{0.95}(n-1)$	E_n
1	71,84	2,81	85,11	7,15	73,6	2,62	2,99	3,84	0,86
2	78,15	3,02	81,28	4,43	79,1	2,50	0,34	3,84	0,29
3	74,72	2,80	77,62	4,23	75,6	2,33	0,33	3,84	0,29
4	71,39	2,67	75,86	4,13	72,7	2,25	0,82	3,84	0,45
5	70,80	2,58	74,13	4,04	71,8	2,17	0,48	3,84	0,35
6	70,56	2,61	74,13	4,00	71,6	2,19	0,56	3,84	0,37
7	68,77	2,55	72,86	3,93	70,0	2,14	0,76	3,84	0,44
8	72,19	2,69	72,86	3,93	72,4	2,22	0,02	3,84	0,07
9	75,89	2,84	72,44	3,91	74,7	2,30	0,51	3,84	0,36
10	74,29	2,96	71,61	3,87	73,3	2,35	0,30	3,84	0,28

Згідно з розрахунками, наведеними у таблицях 4.6, 4.7 та 4.8 результати калібрування гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 узгоджуються з результатами наданими РТВ (Німеччина), тобто виконується умова (4.4), а заявлені ДП НДІ «Система» стандартні невизначеності результатів калібрування не потребують коригування відповідно до умови (4.7), оскільки розрахований параметр E_n в діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц менший за 1, а, отже умова (4.5) виконана.

4.4 Висновок до розділу

Порівняльний аналіз результатів калібрування гідрофонів, отриманих у ДП НДІ «Система» та наданих РТВ, підтвердив коректність застосування удосконаленої математичної моделі передавальної характеристики. Зокрема, було підтверджено доцільність заміни геометричних параметрів ультразвукового перетворювача (радіуса та площі) на ефективний радіус і ефективну площу, та зменшення стандартної невизначеності коефіцієнтів дифракційних втрат.

Крім того, було підтверджено вимірювальні та калібрувальні можливості еталона НДЕТУ AUV-02-2018, що є важливим для майбутніх міжнародних звірень із національними еталонами інших країн, забезпечуючи його відповідність сучасним метрологічним вимогам. З метою проведення міжнародних звірень еталона НДЕТУ AUV-02-2018 підготовлено проект технічного протоколу пілотних звірень (Додаток А).

Порівняння результатів калібрування голкових гідрофонів №2515, №2538 та мембранного гідрофона МН-12 наданих РТВ та ДП НДІ «Система» показало їх узгодженість у діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц та підтвердило достовірність результатів калібрування гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 з використанням обраного методу калібрування та вимірювального обладнання. Особливо важливим є отримання узгоджених результатів калібрування мембранного гідрофона, оскільки його завжди використовують як еталон порівняння під час проведення міжнародних звірень.

ВИСНОВОК

У дисертаційній роботі проведено дослідження щодо підвищення точності калібрування гідрофонів у водному середовищі у діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц. Результати дослідження можна охарактеризувати такими висновками:

1. За результатами проведеного порівняльного аналізу методів калібрування гідрофонів у водному середовищі для реалізації на первинному еталоні одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі обрано метод взаємності з двома перетворювачами, за критерієм досягнення необхідного рівня невизначеності за мінімальних фінансових затрат.

2. За результатами проведеного аналізу джерел невизначеності передавальної характеристики гідрофона, виявлено 12 вхідних параметрів, кожен з яких має вплив на сумарну стандартну невизначеність. Встановлено, що найбільший внесок у сумарну стандартну невизначеність передавальної характеристики гідрофона вносять такі параметри як ефективна площа ультразвукового перетворювача (УП), коефіцієнти дифракційних втрат G_1 , G_2 та вимірювальна відстань d .

3. Реалізовано методи вимірювання ефективного радіусу та ефективної площі ультразвукових перетворювачів, що дозволило визначити ефективні площі та радіуси УП.

4. За результатами досліджень комплекту УП отримано значення ефективних площ випромінювання УП A_{ER} на робочих частотах, та оцінена їх стандартна невизначеність $u_{c(A_{ER})}$. Отримані результати дали можливість перейти від застосування геометричної до ефективної площі УП у математичній моделі передавальної характеристики гідрофона, та зменшити стандартну невизначеність цього параметру з 4,5% до 1,8-2,6 % (залежно від робочої частоти та типу УП).

5. Отримано значення ефективних радіусів УП a_{tr} на робочих частотах, та оцінена їх стандартна невизначеність $u_{c(a_{tr})}$. Отримані результати дали можливість правильно визначити вимірювальну відстань d для окремого УП, оскільки вона на пряму впливає на точність визначення передавальної

характеристики гідрофона. Зменшено стандартну невизначеність визначення вимірювальної відстані d з 4,6% до менше ніж 2,0 % (залежно від робочої частоти та типу УП).

6. Проведено порівняння розрахунків коефіцієнтів дифракційних втрат G_1 та G_2 за методами запропонованими у працях Фея та Бейснера. Результати розрахунків підтвердили узгодженість та взаємозамінність вищезазначених методів, що дозволило визначити границю похибки для параметрів G_1 та G_2 , яка становить 0,1%. Це дозволило на порядок зменшити вклад у сумарну стандартну невизначеність передавальної характеристики гідрофона від параметрів G_1 та G_2 з 2,5% для G_1 та 4,0% для G_2 до 0,1%.

7. Дослідження коефіцієнта шунтування $K_R(f)$ підтвердило правильність його застосування як поправки до значення вимірюної напруги $U_1(f)$ у математичній моделі передавальної характеристики гідрофона. На основі отриманих результатів запропоновано удосконалену математичну модель передавальної характеристики гідрофона. У математичній моделі вилучено параметр - струм збудження УП $I_1(f)$, що дозволило зменшити сумарну стандартну невизначеність калібрування гідрофона на 0,2%.

8. Порівняльний аналіз результатів калібрування гідрофонів, отриманих у ДП НДІ «Система» та наданих РТВ, підтвердив коректність застосування удосконаленої математичної моделі передавальної характеристики гідрофона. Результати калібрування голкових та мембранного гідрофона на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 узгоджуються з даними наданими РТВ у діапазоні частот від 1 МГц до 10 МГц.

9. Проведені дослідження дозволили підвищити точність калібрування гідрофона, зменшивши розширену невизначеність калібрування гідрофона на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 до 9% у порівнянні із заявленою у паспорті на еталон – 14%.

10. Результати проведених досліджень дозволили стверджувати, що за точносними характеристиками еталон НДЕТУ AUV-02-2018 відповідає рівню кращих світових еталонів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Szabo, Thomas L. Diagnostic ultrasound imaging: inside out. Academic press, 2013.
2. A. Carovac, F. Smajlovic, D. Junuzovic, Application of Ultrasound in Medicine, Acta Inform Med, 2011, Sep;19(3): Pages 168–171. doi: 10.5455/aim.2011.19.168-171.
3. Gail ter Haar, Therapeutic applications of ultrasound, Progress in Biophysics and Molecular Biology, Volume 93, Issues 1–3, January–April 2007: Pages 111-129. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.005>.
4. Leighton T. What is ultrasound? Progress in Biophysics and Molecular Biology, 2007, 93(1-3), 3–83. doi:10.1016/j.pbiomolbio.200.
5. ДСТУ EN 61846:2022 - Ультразвук. Імпульсні літотриптори тиску. Характеристики полів (EN 61846:1998, IDT; IEC 61848:1998, IDT).
6. ДСТУ EN IEC 61689:2022 - Ультразвук. Фізіотерапевтичні системи. Польові специфікації та методи вимірювання в діапазоні частот від 0,5 МГц до 5 МГц (EN IEC 61689:2022, IDT; IEC/TS 61689:2022, IDT).
7. ДСТУ EN IEC 62127-1:2022 - Ультразвук. Гідрофони. Частина 1. Вимірювання та характеристика медичних ультразвукових полів (EN IEC 62127-1:2022, IDT; IEC/TS 62127-1:2007, IDT). 2022.
8. ДСТУ EN 62359:2018 - Ультразвук. Характеристики поля. Методи випробування для визначення теплових та механічних індексів, пов'язаних з діагностичними ультразвуковими полями (EN 62359:2011, IDT; IEC 62359:2010, IDT).
9. Дувіряк Д., Шпак О., Паракуда В. Еталон одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі // Вимірювальна техніка та метрологія. 2019. Том 80, вип. 3, С. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtn2019.03.058>.
10. Duviriak D.; Shpak O.; Parakuda V., Kizlivskyi I. Experimental investigation on the effective radiating area of ultrasonic transducers with the aim of increasing the reproduction accuracy of the unit of ultrasonic pressure in water //

Ukrainian Metrological Journal. 2022. Vol. 1, P. 44–50. DOI: 10.24027/2306-7039.1.2022.258819 (WoS Q4).

11. Shpak O., Duviriak D. Study of the effective radii of ultrasonic transducers // Measuring Equipment and Metrology. 2024. Vol. 85, No. 3, pp. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.03.010>.

12. Шпак О., Дувіряк Д. Верифікація результатів калібрування голкових гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 // Український метрологічний журнал. 2024. вип. 3, С. 11–21. (WoS Q4) DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2024.312327>.

13. Дувіряк Д.В., Шпак О.В. «Створення еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі» ст. 23; Тези доповідей // XI міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка», 9-11 жовтня 2018 року, м. Харків.

14. Паракуда В.В., Дувіряк Д.В., Шпак О.В., «Сучасний стан і розвиток еталонів акустичних величин в Україні», ст. 27; Тези доповідей // XI міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка», 9-11 жовтня 2018 року, м. Харків.

15. Шпак О.В., Паракуда В.В., «Забезпечення єдності та простежуваності вимірювань в Україні ультразвукового тиску у водному середовищі», ст. 95; Тези доповідей // V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» 29 січня - 2 лютого 2019 року, смт. Славське.

16. Шпак О.В., Кізлівський І.Г., «Єдність вимірювань потужності ультразвукового випромінювання в Україні», ст. 93; Тези доповідей // V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» 29 січня - 2 лютого 2019 року, смт. Славське.

17. Кізлівський І., Шпак О., Бубела І., «Оцінювання непевності у вимірюванні електроакустичної провідності на еталоні потужності ультразвуку», ст. 120; Тези доповідей // Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019: XXIII Міжнародного семінару метрологів (МСМ'2019) до 100-річчя кафедри

інформаційно-вимірювальних технологій, 10–12 вересня 2019 року, – Львів, 2019.

18. Вінниченко О.М., Шпак О.В., Кізлівський І.Г., Демчук Т.В., «Вплив швидкості розповсюдження звукової хвилі на непевність вимірювання ультразвукової потужності», ст. 36-38., Тези доповідей; // VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2020», 4-7 лютого 2020 року, смт. Славське.

19. Паракуда В., Кізлівський І., Шпак О., Копча М., Бубела І., «Впровадження національних стандартів для забезпечення якості вимірювання ультразвукових параметрів», ст. 16-17 // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції, 20–21 травня 2021 року, м. Львів (ISBN 978-966-441-654-9, <http://science.lpnu.ua/qm-2021>).

20. Oleksandr Shpak, Dariia Duviriak, Vasyl Parakuda «Effective radii of ultrasonic transducers for hydrophone calibration», ст. 78, тези доповідей // II Міжнародна наукова-практична конференція: Інформаційно-вимірювальні технології IBT-2024, 13–14 листопада 2024 року, м. Львів (ISBN 978-966-941-972-9, <https://science.lpnu.ua/ibt-2024/proceedings> <http://science.lpnu.ua/qm-2021>).

21. Roy C. Preston, Output Measurements for Medical Ultrasound, ISBN 0-540-19692-7.

22. Gerald R. Harris, Samuel Howard, Andrew Hurrell, Peter A. Lewin, Mark E. Schafer, Keith A. Wear, Volker Wilkens, Bajram Zeqiri Hydrophone Measurements for Biomedical Ultrasound Applications: A Review. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, October 2022, DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3213185.

23. A. S. DeReggi and G. R. Harris, "Polymer Hydrophone Probes," in 1980 IEEE Ultrason. Symp., 1980, no. 0090-5607/80/000O-0598, pp. 598-599.

24. H. R. Gallantree and R. A. Smith, "Small area membrane hydrophones," in IEEE Ultrasonics Symposium, 1987, pp. 761-764.

25. N. C. Chaggares, O. Ivanytskyy, and G. Pang, "Design of a 30 μ m aperture membrane hydrophone for the measurement and characterization of High Frequency ultrasound," in IEEE Int. Ultrason. Symp., 2016.
26. S. Robinson, R. Preston, M. Smith, and C. Millar, "PVDF reference hydrophone development in the UK-from fabrication and lamination to use as secondary standards," IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, vol. 47, no. 6, pp. 1336-44, 2000.
27. V. Wilkens and W. Molkenstruck, "Broadband PVDF membrane hydrophone for comparisons of hydrophone calibration methods up to 140 MHz," IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, vol. 54, no. 9, pp. 1784-1791, Sep 2007.
28. V. Wilkens, S. Sonntag, and O. Georg, "Robust spot-poled membrane hydrophones for measurement of large amplitude pressure waveforms generated by high intensity therapeutic ultrasonic transducers," J. Acoust. Soc. Am., vol. 139, no. 3, pp. 1319-1332, Mar 2016.
29. A. Selfridge and P. Goetz, "Ellipsoidal hydrophone with improved characteristics " in IEEE Int. Ultrason. Symp., 1999, pp. 1181-1184.
30. M. Platte, "A Polyvinylidene Fluoride Needle Hydrophone for Ultrasonic Applications," Ultrasonics, vol. 23, no. 3, pp. 113-118, 1985.
31. P. A. Lewin, "Miniature Piezoelectric Polymer Ultrasonic Hydrophone Probes," Ultrasonics, vol. 19, no. 5, pp. 213-216, 1981.
32. B. Fay, G. Ludwig, C. Lankjaer, and P. A. Lewin, "Frequency-Response of PvdF Needle-Type Hydrophones," Ultrasound in Med. & Biol., vol. 20, no. 4, pp. 361-366, 1994.
33. J. Staudenraus and W. Eisenmenger, "Fiberoptic Probe Hydrophone for Ultrasonic and Shock-Wave Measurements in Water," Ultrasonics, vol. 31, no. 4, pp. 267-273, Jul 1993.
34. M. S. Canney, M. R. Bailey, L. A. Crum, V. A. Khokhlova, and O. A. Sapozhnikov, "Acoustic characterization of high intensity focused ultrasound fields: A combined measurement and modeling approach," J. Acoust. Soc. Am., vol. 124, no. 4, pp. 2406-2420, Oct 2008.

35. P. C. Beard and T. N. Mills, "Miniature optical fibre ultrasonic hydrophone using a Fabry-Perot polymer filme interferometer," *Electronics Let.*, vol. 33, no. 9, pp. 801-803, 1997.
36. C. Koch, "Coated fiber-optic hydrophone for ultrasonic measurements," *Ultrasonics*, vol. 34, no. 6, pp. 687-689, 1996.
37. P. Morris, "A Fabry-Perot fibre-optic hydrophone for the characterisation of ultrasonic fields," Ph.D., University College, London, 2008.
38. K. A. Wear and S. M. Howard, "Directivity and frequency-dependent effective sensitive element size of a reflectance-based fiber optic hydrophone: predictions from theoretical models compared with measurements," *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 65, no. 12, pp. 2343-2348, 2018.
39. J. Martin Bland, Douglas G. Altman. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *International Journal of Nursing Studies*. Volume 47, Issue 8, August 2010, Pages 931-936. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2009.10.001>.
40. ДСТУ ІЕС 62127-2:2009 Ультразвук. Гідрофони. Частина 2. Калібрування для ультразвукових полів частотою до 40 МГц включно (ІЕС 62127-2:2007, IDT).
41. C. Koch; W. Molkenstruck, Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* (Volume: 46, Issue: 5, September 1999).
42. Beissner, K. Radiation force and force balances. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds.. *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, p. 127-142.
43. ДСТУ EN 61161:2017 Ультразвук. Вимірювання потужності. Метод балансу радіаційних сил (EN 61161:2013, IDT).
44. Beissner, K. On the plane-wave approximation of acoustic intensity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 71, p. 1406-1411.
45. Herman, BA. and Harris, GR. Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 72, p. 1357-1363.

46. G. Ludwig and K. Brendel, "Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 35, pp. 168–174, 1988.

47. R. J. Bobber, "General reciprocity parameter," J. Acoust. Soc. Amer., vol. 39, pp. 680–687, 1966.

48. ДСТУ EN 60601-2-37:2015 Вироби медичні електричні. Частина 2-37. Додаткові вимоги щодо безпеки та основних робочих характеристик ультразвукового медичного обладнання для діагностики та контролю (EN 60601-2-37:2008; A11:2011, IDT).

49. ДСТУ EN 60601-2-5:2019 Вироби медичні електричні. Частина 2-5. Додаткові вимоги щодо безпеки апаратів для ультразвукової фізіотерапії (EN 60601-2-5:2015, IDT; IEC 60601-2-5:2009, IDT).

50. ДСТУ EN 60601-2-62:2022 Вироби медичні електричні. Частина 2-62. Додаткові вимоги щодо основної безпеки та основних характеристик обладнання високої інтенсивності терапевтичного ультразвуку (HITU) (EN 60601-2-62:2015, IDT; IEC 60601-2-62:2013, IDT).

51. Науково-технічний звіт про Науково-дослідну та дослідно-конструкторську роботу "Створення державного первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі" (заключний, шифр 06.17.23), Державний реєстраційний № 0117U004690, ДП НДІ «Система», Львів, 2017.

52. ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування. Посібники з вираження невизначеності вимірювань (РМГ 43-2001, IDT).

53. Current Probe P6022, technical specification - <https://www.tek.com/en/datasheet/ac-current-probes>.

54. Digital Storage Oscilloscopes TDS2024C, Technical specification - <https://download.tek.com/datasheet/TDS2000C-Digital-Storage-Oscilloscope-Datasheet-3GW256458.pdf>.

55. Mana Instruments, Immersion ultrasound transducers - <http://mindt.com/transducers.html>.

56. Bilaniuk, N., Wong, GSK. Speed of sound in pure water as a function of temperature. J. Acoust. Soc. Am., 1993, vol. 93, p.2306.

57. Frank E. Jones, Georgia L. Harris. ITS-90 Density of Water Formulation for Volumetric Standards Calibration. J. Res. Natl. Inst. Stand. 1992, Vol. 97, p.335.
58. IEC TS 62903:2023 Ultrasonics - Measurements of electroacoustical parameters and acoustic output power of spherically curved transducers using the self-reciprocity method.
59. Gitis, M. B., Khimunin, A. S., Diffraction corrections for measurements of the absorption coefficient and velocity of sound. Sov. Phys. Acoust. 14 [1969], 305. DOI:10.1016/0041-624X(69)90563-0.
60. Stenzel, H. and Brosze, O., Leitfaden zur Berechnung von Schallvorgängen. Springer, Berlin 1958.
61. Fay, B. Numerische Berechnung der Beugungsverluste im Schallfeld von Ultraschallwandlern. Acustica, 1976, vol. 36, p. 209-213.
62. K. Beissner, Exact integral expression for the diffraction loss of a circular piston source, Acustica 49 (1981) 212–217.
63. Technical protocol document covering the BIPM/CIPM Key Comparison CCAUV.U-K4 (hydrophone free-field open-circuit sensitivity in the megahertz frequency range). National Physical Laboratory, Teddington, Version 0.10.
64. Звіт про науково-дослідну роботу “Дослідження стабільності відтворення та зберігання одиниць вимірювання державними первинними еталонами, що зберігаються в державному підприємстві ДП НДІ «Система»”, Державний реєстраційний № 0121U111759, м. Львів, 2020.
65. R. C. Chivers, L. Bosselaar, P. R. Filmore, “Effective area to be used in diffraction corrections”, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 68, no. 1, p. 80–84, 1980, doi: 10.1121/1.384507.
66. CMC Data NMI PTB (Germany) - Acoustics, Ultrasound - Sound in water – https://www.bipm.org/kcdb/cmc/search?domain=PHYSICS&areaId=1&keywords=PTB&specificPart.branch=3&specificPart.service=-1&specificPart.subService=-1&specificPart.individualService=-1&_countries=1&publicDateFrom=&publicDateTo=&unit=&minValue=&maxValue=&minUncertainty=&maxUncertainty= .

67. M. G. Cox. The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset. *Metrologia* 44 (2007) pp. 187–200, DOI: 10.1088/0026-1394/44/3/005.

ДОДАТОК А
ТЕХНІЧНИЙ ПРОТОКОЛ ПЛОТНИХ ЗВІРЕНЬ
(ПРОЕКТ)

ЗВІРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КАЛІБРУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ГІДРОФОНА У ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ ВІД 1,0 МГц ДО 10 МГц

Науково-дослідний відділ методів та засобів еталонних вимірювань

ДП НДІ «Система»

м. Львів, М. Кривоноса, 6

ТЕХНІЧНИЙ ПРОТОКОЛ ПЛОТНИХ ЗВІРЕНЬ
(чутливість холостого ходу гідрофона у вільному полі)

1 ВСТУП

1.1 Мета документа

Цей документ описує процедуру, яку треба використовувати під час пілотного звірення CCAUV.U____ (BIPM/CIPM). Звірення передбачає виконання калібрування ультразвукового гідрофона з діаметром активного елемента 1 мм, що використовується у діапазоні частот від 1,0 МГц до 10 МГц, а саме, визначення його чутливості у вільному полі за напруги холостого ходу.

1.2 Порядок проведення та учасники пілотного звірення

Координатором звірення (піотною лабораторією) є Національний метрологічний інститут Німеччини (РТВ). Окрім організації звірення, РТВ виконуватиме еталонне калібрування гідрофона до і після завершення звірення. РТВ також відповідатиме за зведення звітів, отриманих від лабораторій-учасниць, і підготовку остаточного Звіту про пілотне звірення.

Лабораторії - учасники звірень та їх контактні дані:

РТВ (Німеччина) - Dr Volker Wilkens

Bundesallee 100

38116 Braunschweig Germany, Tel: +49 531 592 1423

Email: volker.wilkens@ptb.de

ДП НДІ «Система» (Україна) - Начальник сектора - Дарія Володимирівна Дувіряк

79008, м. Львів, М. Кривоноса, 6, Тел. +38 (032) 2399200

Email: office@dndi-systema.lviv.ua

1.3 Графік калібрування

Графік калібрування подано нижче:

№	Назва інституту	Дата початку	Дата закінчення
1	РТВ	1 липня 2025	15 липня 2025
2	ДП НДІ «Система»	29 липня 2025	12 серпня 2025
3	РТВ	26 серпня 2025	9 вересня 2025

1.4 Інформація про гідрофон

Гідрофон, що використовується для звірення - це мембранний гідрофон з активним елементом із полівінілденфторидної плівки (PVDF) виробництва фірми GAMPT, який буде надано пілотною лабораторією. Гідрофон обрано з діаметром активного елемента 1 мм, для того щоб забезпечити достатню чутливість під час калібрування абсолютними методами. На рисунку 1 представлена фотографія такого гідрофона.



Рисунок 1 - Мембранний гідрофон фірми GAMPT типу MH12, який буде використаний в рамках пілотного звірення (зовнішній діаметр опорного кільця - 130 мм)

1.5 Інформація про попередній підсилювач гідрофона

Під час калібрування гідрофона необхідно використовувати попередній підсилювач (ПП) з низьким вхідним імпедансом, оскільки це зменшує вплив електричного навантаження на гідрофон. Попередній підсилювач [1] буде наданий у комплекті з гідрофоном, а лабораторія-учасник має його використовувати під час вимірювань. Підсилювач працює від напруги живлення від 8 В до 15 В, яку повинен забезпечити користувач. Коефіцієнт підсилення підсилювача повинен бути виміряний учасником звірень на кожній частоті калібрування і має бути поданий у звіті (таблиця А.1) разом з іншими результатами калібрування.

1.6 Параметр, що підлягає звітуванню

Чутливість гідрофона, яку необхідно подати у звіті, - це чутливість холостого ходу гідрофона на кінці кабелю [2]. Чутливість визначають як відношення миттєвої напруги холостого ходу на кінці кабелю або вихідного роз'єму гідрофона до миттєвого акустичного тиску в незбуреному вільному полі плоскої хвилі [2].

Чутливість гідрофона треба вимірювати на частотах 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 та 10 МГц. Усі учасники звірень повинні вказати температуру води під час вимірювання.

1.7 Транспортування

Лабораторія-учасник відповідає за транспортування гідрофона до пілотної лабораторії. Бажано, щоб гідрофон перевозив персонал лабораторії в пасажирському салоні літака. Якщо це неможливо, гідрофон потрібно перевезти назад до РТВ авіатранспортом у вантажному відсіку з контрольованою температурою. Гідрофон і попередній підсилювач будуть упаковані в захисний футляр та з оформленим АТА карнетом. Лабораторія-учасник повинна дотримуватися митних правил. Якщо гідрофон повертають до РТВ без супроводу персоналу, АТА карнет повинен бути з іншими супровідними документами, щоб брокер міг провести митне оформлення. У жодному разі АТА карнет не повинен бути упакований в середину захисного футляра.

2 ПРАКТИЧНІ ВКАЗІВКИ

2.1 Отримання гідрофона

Лабораторія-учасник повинна повідомити пілотну лабораторію (РТВ) про прибуття гідрофона. Після отримання лабораторія-учасник повинна негайно перевірити гідрофон на наявність будь-яких пошкоджень і переконатися, що вони працюють належним чином.

2.2 Догляд за гідрофоном

Гідрофон не повинен піддаватися впливу температур, що виходять за межі діапазону 0 - 40 °С, а також не повинен піддаватися безперервному яскравому сонячному світлу.

2.3 Підготовка води для калібрування

Вода, що використовується для калібрування, повинна мати провідність нижче ніж 5 мкСм (питомий опір більше ніж 0,5 МОм). Вода повинна бути дегазованою перед використанням, оскільки це виключає можливість утворення бульбашок повітря на гідрофоні і зменшує ймовірність виникнення кавітації. Як додатковий запобіжний захід проти утворення бульбашок, рекомендовано занурити гідрофон у свіжій дегазованій воді щонайменше на 30 хвилин перед використанням.

У мембранного гідрофона існує ймовірність потрапляння великих бульбашок повітря під опорне кільце. Такі бульбашки треба обережно видалити за допомогою невеликої м'якої щітки. Мембранний гідрофон постачається із заземлювальним виводом, який треба під'єднати до металевого предмета в резервуарі, наприклад, до кріплення гідрофона. Під час калібрування треба виміряти провідність і вміст кисню у воді та записати їх у звітний документ (таблиця А.3).

Температуру води треба вимірювати (бажано з точністю до 0,1 С) протягом усього калібрування.

2.4 Вказівки щодо використання гідрофона

2.4.1 Вирівнювання

Визначення чутливості гідрофона, наведене в розділі 1.5, є неповним, оскільки воно не визначає орієнтацію гідрофона по відношенню до вхідної хвилі. Щоб знайти цей напрямок, гідрофон треба розташувати активним елементом (стороною, де мембрана знаходиться майже врівень з кільцем), спрямованим у бік давача і приблизно перпендикулярно до вхідної хвилі, а потім повертати його в двох напрямках навколо активного елемента до отримання максимального

прийнятого сигналу. Для отримання цього максимуму достатньо повернути гідрофон на кілька градусів.

2.4.2 Просторове усереднення

Якщо необхідно внести поправки на просторове усереднення для активного елемента гідрофона, то треба звернути увагу на те, що ефективний радіус мембранного гідрофона може значно відрізнятись від його геометричного радіуса, особливо на частотах нижче 2 МГц, де ефективний радіус може бути значно більшим, ніж очікується. Залежність радіуса мембранного гідрофона від частоти буде надано пілотною лабораторією (таблиця А.2).

3 ПРОЦЕДУРА КАЛІБРУВАННЯ

3.1 Виконайте калібрування, звертаючи особливу увагу на температуру води та частоту калібрування. Якщо виникнуть будь-які проблеми, які можуть затримати вимірювання, будь ласка, негайно зв'яжіться з РТВ, щоб домовитися про перегляд дати завершення вимірювань.

3.2 На кожній частоті виконайте щонайменше 4 незалежних калібрування гідрофона, бажано в різні дні і з вийманням гідрофона з резервуара між вимірюваннями. Звіт про кожну серію результатів вимірювань треба подати в таблиці (див. таблиця А.3).

3.3 Обчисліть середнє значення вимірювань і стандартну невизначеність за типом А (випадкову).

3.4 Занесіть остаточний результат у зведену таблицю (таблиця А.4) разом з оціненою стандартною невизначеністю за типом В (систематичною) та розширеною (загальною) невизначеністю для кожної частоти.

Розширену невизначеність треба отримати шляхом об'єднання невизначеностей типу А і типу В відповідно до процедури, наведеної в [3].

3.5 Надайте повний письмовий опис методу калібрування згідно з інформацією поданою в Додатку В, зазначаючи будь-які особливі проблеми, що виникли під час вимірювань.

3.6 Попередньо повідомивши РТВ, поверніть гідрофон та результати вимірювань до РТВ.

4 ЗВІТУВАННЯ

4.1 Після того, як лабораторія-учасник завершить свої вимірювання, вона повинна скласти звіт з описом своїх вимірювань, використовуючи Настанови, що містяться в Додатку В до цього Технічного протоколу. Цей звіт повинен бути представлений пілотній лабораторії не пізніше, ніж через один місяць після завершення вимірювань лабораторії-учасника.

4.2 Пілотна лабораторія заповнює проект звіту про пілотні звірення, керуючись настановами, викладеними в документі «Настанови щодо проведення звірень з CCAUV» (www.bipm.org/utis/en/pdf/CCAUV-GoC). Звіт буде надіслано лабораторії-учаснику для коментарів піотною лабораторією не пізніше, ніж через три місяці після завершення остаточної перевірки гідрофона у пілотній лабораторії.

5 НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ

Настанова СІРМ вимагає, щоб лабораторії-учасники подавали свій повний бюджет невизначеності заздалегідь. Тому кожна лабораторія-учасник повинна подати бюджет невизначеності до піотної лабораторії до початку вимірювань. Зміни у задекларованому бюджеті невизначеності після того, як лабораторія завершила вимірювання, є прийнятними, якщо причини зміни розширеної невизначеності та/або будь-яких складових розширеної невизначеності детально пояснені.

Бюджет невизначеності повинен включати основні складові невизначеності на кожній частоті, а також всю необхідну інформацію, що обґрунтовує, як вони були отримані [3]. На додаток до основних складових невизначеності, спільних для всіх учасників, лабораторії-учасники можуть додавати інші складові невизначеності, за умови надання достатньої пояснювальної інформації.

ДОДАТОК В.

ЗМІСТ ОСТАТОЧНОГО ЗВІТУ ПРО КАЛІБРУВАННЯ

Нижче наведено контрольний список інформації, необхідної для остаточного звіту, що подається до РТВ, який описує калібрування гідрофонів, виконані учасниками.

1. Як була підготовлена вода для калібрування?
2. Чи був гідрофон замочений у дегазованій воді перед використанням і як довго?
3. Чи використовувався попередній підсилювач? Якщо ні, опишіть, як було отримано поправку холостого ходу.
4. Чи потрібно було визначати коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача? Якщо так, опишіть метод і оцініть його точність.
5. Який тип вимірювальної ємності використовувався (вказіть розмір матеріал, з якого вона виготовлена) і як було виконано заземлення або екранування?
6. Як були отримані будь-які поправки для просторового усереднення?
7. Який акустичний тиск використовувався на кожній частоті калібрування?
8. Яка відстань(ні) поширення використовувалася(лися) на кожній частоті калібрування?

Опишіть використаний метод калібрування, включно із будь-якими особливостями або труднощами, які виникали під час вимірювань.

ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові публікації, в яких опубліковано основні наукові результати:	
1. Дувіряк Д., Шпак О., Паракуда В. Еталон одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі // Вимірювальна техніка та метрологія. Том 80, вип. 3, С. 58–63., 2019.	
Тип публікації	Публікація в українському виданні, категорія Б
Рік	2019
Ключові слова	ультразвук, ультразвуковий тиск, простежуваність, непевність вимірювання, первинний еталон
DOI	10.23939/istcmtm2019.03.058
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.058
2. Duviriak D.; Shpak O.; Parakuda V., Kizlivskiy I. Experimental investigation on the effective radiating area of ultrasonic transducers with the aim of increasing the reproduction accuracy of the unit of ultrasonic pressure in water // Ukrainian Metrological Journal. 2022. Vol. 1, P. 44–50 (WoS Q4)	
Тип публікації	Публікація в українському виданні, категорія А
Рік	2022
Ключові слова	effective radiating area; ultrasonic beam; ultrasonic pressure; ultrasonic transducer; uncertainty
DOI	10.24027/2306-7039.1.2022.258819
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258819
3. Shpak O., Duviriak D. Study of the effective radii of ultrasonic transducers // Measuring Equipment and Metrology. 2024. Vol. 85, No. 3, pp. 10–16.	
Тип публікації	Публікація в українському виданні, категорія Б
Рік	2024
Ключові слова	Ultrasonic Pressure, Hydrophone, Ultrasonic Transducer, Effective Radius, Uncertainty
DOI	10.23939/istcmtm2024.03.010
Одноосібне авторство	Ні

Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://doi.org/10.23939/istcm2024.03.010
4. Шпак О., Дувіряк Д. Верифікація результатів калібрування голкових гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 // Український метрологічний журнал. 2024. вип. 3, С. 11–21. (WoS Q4)	
Тип публікації	Публікація в українському виданні, категорія А
Рік	2024
Ключові слова	ультразвук; гідрофон; калібрування; метод взаємності; метод порівняння; верифікація результатів
DOI	10.24027/2306-7039.3.2024.312327
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2024.312327
Інші публікації:	
5. Дувіряк Д. В., Шпак О. В. / Створення еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі / XI Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка” (МЕТРОЛОГІЯ-2018), 9-11 жовтня 2018 року: тези доповідей. – Харків: ННЦ “Інститут метрології”. 2018. с. 27.	
Тип публікації	Інші публікації
Рік	2018
Ключові слова	еталони, тиск, потужність, акустика, ультразвук
DOI	ультразвук, первинний еталон, ультразвуковий тиск, простежуваність вимірювань
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/news/M-2018/MVT2018_Tezisy.pdf
6. Дувіряк Д. В., Шпак О. В. Сучасний стан і розвиток еталонів акустичних величин в Україні / XI Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка” (МЕТРОЛОГІЯ-2018), 9-11 жовтня 2018 року: тези доповідей. – Харків: ННЦ “Інститут метрології”. 2018. с. 23.	
Тип публікації	Інші публікації
Рік	2018
Ключові слова	еталони, тиск, потужність, акустика, ультразвук

DOI	
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/news/M-2018/MVT2018_Tezisy.pdf
7. Шпак О.В., Паракуда В.В., «Забезпечення єдності та простежуваності вимірювань в Україні ультразвукового тиску у водному середовищі», // V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» 29 січня - 2 лютого 2019 року, смт. Славське; Тези доповідей, 2019, ст. 95	
Тип публікації	Інші публікації
Рік	2019
Ключові слова	ультразвук, первинний еталон, ультразвуковий тиск, простежуваність, вимірювань
DOI	
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://science.lpnu.ua/tum-2019
8. Шпак О.В., Кізілівський І.Г., «Єдність вимірювань потужності ультразвукового випромінювання в Україні» // V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» 29 січня - 2 лютого 2019 року, смт. Славське; Тези доповідей, 2019, ст. 93	
Тип публікації	Інші публікації
Рік	2019
Ключові слова	акустична потужність, простежуваність вимірювання, радіаційна сила, ультразвук, ультразвукова медична апаратура
DOI	
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://science.lpnu.ua/tum-2019
9. Кізілівський І., Шпак О., Бубела І., «Оцінювання непевності у вимірюванні електроакустичної провідності на еталоні потужності ультразвуку» // Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019: XXIII Міжнародного семінару метрологів (МСМ'2019) до 100-річчя кафедри інформаційно-	

вимірювальних технологій, 10–12 вересня 2019 року, – Львів, 2019, Тези доповідей, ст. 120	
Тип публікації	Інші публікації
Рік	2019
Ключові слова	
DOI	
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2019/15969/importantdoc/tezykonferenciyi.pdf
10. Вінниченко О.М., Шпак О.В., Кізлівський І.Г., Демчук Т.В., «Вплив швидкості розповсюдження звукової хвилі на непевність вимірювання ультразвукової потужності», // VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2020», 4-7 лютого 2020 року, смт. Славське, Тези доповідей, 2020, ст. 36-38.	
Тип публікації	Інші публікації
Рік	2020
Ключові слова	непевність вимірювання, потужність ультразвуку, температура, ультразвук, швидкість звукові хвилі
DOI	
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2020/20543/importantdoc/tezyukr-tum-2020v2.pdf
11. Паракуда В., Кізлівський І., Шпак О., Копча М., Бубела І., «Впровадження національних стандартів для забезпечення якості вимірювання ультразвукових параметрів» // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи. // V Міжнародна науково-практична конференція, 20–21 травня 2021 року, м. Львів. Тези доповідей, 2021, ст. 16-17 (ISBN 978-966-441-654-9)	
Тип публікації	Інші публікації
Рік	2021
Ключові слова	
DOI	
Одноосібне авторство	Ні

Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2021/23330/importantdoc/tezyquality2021.pdf
12. Oleksandr Shpak, Dariia Duviriak, Vasyl Parakuda «Effective radii of ultrasonic transducers for hydrophone calibration» // II Міжнародна наукова-практична конференція: Інформаційно-вимірювальні технології IBT-2024, 13–14 листопада 2024 року, м. Львів. Тези доповідей, 2024, ст. 78, (ISBN 978-966-941-972-9)	
Тип публікації	Інші публікації
Рік	2024
Ключові слова	
DOI	
Одноосібне авторство	Ні
Містить державну таємницю/службову інформацію	Ні
Посилання	https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/nov/36513/zbirniktezkonferenciiivt2024nasait.pdf

ДОДАТОК В

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. директора ДП НДІ «Система»



Роман ЛЕСЬКО

2025 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційного дослідження Шпака О.В.
на тему «Підвищення точності калібрування гідрофонів у водному
середовищі»**

поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування)

Цим актом підтверджуємо, що основні результати наукових досліджень, отримані у дисертаційній роботі Шпака Олександра Володимировича, застосовано під час калібрування гідрофонів на національному державному первинному еталоні одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі НДЕТУ AUV-02-2018, а саме:

- застосовано удосконалену математичну модель передавальної характеристики гідрофона у методиці калібрування гідрофонів;
- впроваджено алгоритми дослідження ефективної площі та ефективного радіусу ультразвукового перетворювача, який використовується під час калібрування гідрофона.

Впровадження результатів наукових досліджень дозволило зменшити розширену невизначеність вимірювання передавальної характеристики гідрофона на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 з 14 % до 9 %.

Начальник НДВ-12

Іван КІЗЛІВСЬКИЙ

Вчений зберігач
еталона НДЕТУ AUV-02-2018

Дарія ДУВІРЯК