

Верифікація результатів калібрування голкових гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018

О.В. Шпак¹, Д.В. Дувіряк²

¹ НУ "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна
lesykshpak@gmail.com

² ДП НДІ "Система", вул. М. Кривоноса, 6, 79008, Львів, Україна
dardar2410@gmail.com

Анотація

У статті наведено результати верифікації калібрування голкових гідрофонів на національному державному первинному еталоні одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі (НДЕТУ AUV-02-2018). Основною метою дослідження є підтвердження точності калібрування голкових гідрофонів № 2538 та № 2515 шляхом порівняння з результатами калібрування, отриманими на еталоні у РТВ (Німеччина).

Описано методи калібрування гідрофонів, зокрема метод взаємності з двома перетворювачами та метод порівняння, що використовувалися лабораторіями для визначення чутливості гідрофонів. Проведено порівняння результатів калібрування голкових гідрофонів та невизначеності вимірювань, отриманих від НМІ Німеччини (РТВ) і України (ДП НДІ "Система") на частотах у діапазоні від 1 до 10 МГц. Результати дослідження продемонстрували добру узгодженість результатів вимірювань та підтвердили достовірність результатів калібрування голкових гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 з використанням обраного методу калібрування та вимірювального обладнання.

Висновки підтверджують правильність функціонування національного еталона НДЕТУ AUV-02-2018 та його відповідність міжнародному стандарту ІЕС 62127-2, що підвищує довіру до отриманих результатів на міжнародному рівні.

Ключові слова: ультразвук; гідрофон; калібрування; метод взаємності; метод порівняння; верифікація результатів.

Отримано: 27.06.2024

Відредаговано: 23.07.2024

Схвалено до друку: 26.07.2024

Вступ

Державний первинний еталон одиниці ультразвукового тиску (НДЕТУ AUV-02-2018) введено в експлуатацію в Україні у грудні 2017 року. Еталону присвоєно статус національного наказом Мінекономрозвитку України № 1815 від 30.11.2018.

Організація-зберігач національного еталона ДП НДІ "Система" відповідно до статті 6 Закону України "Про метрологію та метрологічну діяльність" повинна проводити звірення еталона з відповідними еталонами інших держав або міжнародними еталонами. Проведення міжнародних звірень – це єдиний надійний метод перевірки правильності результатів калібрування та функціонування первинного еталона.

Звірення дозволяють підтвердити вимірювальні та калібрувальні можливості еталона, що сприяє довірі до отриманих результатів на міжнародному рівні. Проведення звірень важливе з кількох причин:

- вони допомагають уніфікувати методи вимірювань, що забезпечує взаємозамінність та сумісність результатів різних країн (організацій);

- демонструють рівень компетентності національного метрологічного інституту (НМІ) і підтверджують його здатність проводити точні вимірювання;

- сприяють виявленню та усуненню можливих похибок або недоліків у вимірювальних процесах, що підвищує якість та надійність вимірювань;

- стимулюють розвиток нових технологій та методів вимірювання;

- сприяють торгівлі та співпраці між країнами, усуваючи технічні бар'єри.

На жаль, сьогодні проведення міжнародних звірень для НМІ ДП НДІ "Система" неможливе з ряду об'єктивних причин. Це вихід України з міжнародної метрологічної організації СООМЕТ через війну; вступ України до EURO-MET, що вимагає підтвердження компетентності НМІ через повторну акредитацію відповідно до ISO/IEC 17025, а також неможливість пересилання в Україну іншими країнами еталонних артефактів через військові дії.

Тому, з огляду на вищезгадані причини, на сьогодні єдиний правильний метод перевірки функціонування еталона для забезпечення його

простежуваності до Міжнародної системи одиниць (SI) – це проведення калібрування двох голкових гідрофонів зі складу еталона за кордоном, наприклад у НМІ Німеччини – РТВ, який має еталон одиниці ультразвукового тиску у воді з опублікованими СМС-рядками у базі KCDB BIPM.

Мета роботи – перевірити результати калібрування чутливості голкових гідрофонів, які отримані на національному державному первинному еталоні одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі (НДЕТУ AUV-02-2018), а також правильність його функціонування відповідно до обраного методу калібрування та математичної моделі.

Принцип роботи еталона та його функціональна схема

На еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 реалізовано метод взаємності з двома перетворювачами. Для калібрування гідрофон розміщують у відомому акустичному полі, яке формує додатковий ультразвуковий перетворювач (УП) і яке попередньо кількісно оцінюють за процедурою само-взаємності. Визначення чутливості гідрофона $M_h(f)$ методом взаємності з двома перетворювачами відбувається у два етапи.

На першому етапі (рис. 1) методом само-взаємності визначають передавальну характеристику УП за струмом $S_p(f)$, вимірюючи струм $I_1(f)$, що протікає через УП під час випромінювання акустичного сигналу, за формулою [1]:

$$S_p(f) = \frac{P_0(f)}{I_1(f)}, \quad (1)$$

де $I_1(f)$ – струм збудження ультразвукового перетворювача, А; $P_0(f)$ – акустичний тиск, створений на поверхні перетворювача, Па.

Далі випромінений УП акустичний сигнал відбивається від рефлектора, який встановлений перпендикулярно до осі випромінювання УП, і потрапляє назад на УП, що тепер працює у режимі приймання акустичного сигналу. На виході УП вимірюють напругу $U_1(f)$, що виникає під дією відбитого ультразвукового сигналу, та визначають передавальну характеристику ультразвукового перетворювача $M_r(f)$ під час приймання акустичного сигналу за формулою [1]:

$$M_r(f) = \frac{U_1(f)}{P_i(f)}, \quad (2)$$

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 відбитого акустичного сигналу від рефлектора на відстані d , Па.

Коефіцієнт взаємності $J_p(f)$ [2] для взаємного ультразвукового перетворювача виражають формулою:

$$J_p(f) = \frac{M_r(f)}{S_p(f)}. \quad (3)$$

За визначенням, для плоскої біжучої звукової хвилі, згенерованої УП, коефіцієнт взаємності становить [2]:

$$J_p = \frac{2 \cdot A_{ER}}{\rho \cdot c}, \quad (4)$$

де A_{ER} – ефективна площа ультразвукового перетворювача, м²; ρ – густина вимірювального середовища (води), кг/м³; c – швидкість звуку у воді, м/с.

Враховуючи формули (1)–(4), отримуємо рівність, із якої можна визначити тиск $P_0(f)$ на поверхні УП:

$$P_0(f) = \frac{U_1(f)}{P_i(f)} \cdot \frac{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}{2 \cdot A_{ER}}. \quad (5)$$

Оскільки акустичний тиск $P_i(f)$ на поверхні УП, створений відбитим від рефлектора акустичним сигналом на відстані d , залежить від коефіцієнта загасання звукової хвилі у воді α , коефіцієнта відбивання рефлектора k та коефіцієнта дифракційних втрат УП G_1 , то його виражають формулою:

$$P_i(f) = P_0(f) \cdot k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}. \quad (6)$$

Підставивши формулу (6) у (5), отримуємо тиск $P_0(f)$, який можна визначити за допомогою вимірювання електричних величин $U_1(f)$ та $I_1(f)$:

$$P_0(f) = \sqrt{\frac{U_1(f)}{k \cdot G_1 \cdot e^{-\alpha d}} \cdot \frac{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}{2 \cdot A_{ER}}}. \quad (7)$$

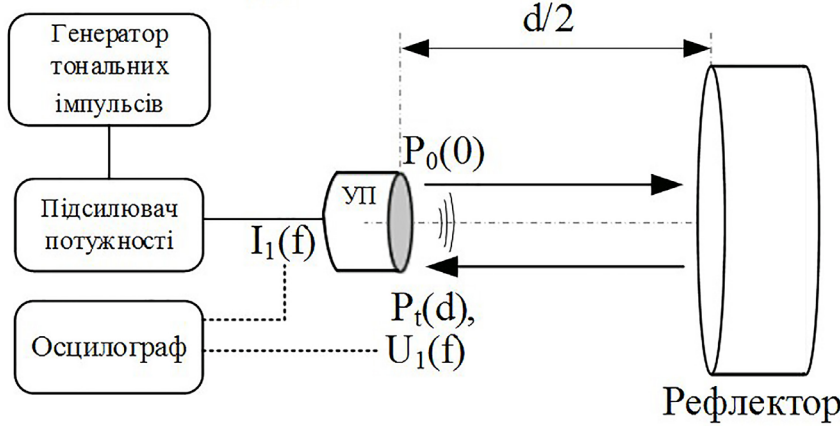
Оскільки під час вимірювання напруги $U_1(f)$, створеної відбитим від рефлектора акустичним сигналом, електричне коло підсилювач потужності – УП не розривається, відбувається шунтування вихідним каскадом підсилювача потужності внутрішнього імпедансу УП під час прийому сигналу, яке корегують за допомогою коефіцієнта шунтування $K_R(f)$, який визначають як:

$$K_R(f) = \frac{I_{SC}(f)}{I_1(f)}, \quad (8)$$

де $I_{SC}(f)$ – струм короткого замикання, А, який вимірюють, від'єднавши УП від підсилювача потужності та замінивши його на ВНС коротку.

На другому етапі вимірювання рефлектор збирають, а гідрофон розміщують в акустичному полі УП (рис. 1), при цьому струм збудження УП $I_1(f)$ на першому та другому етапі вимірювання залишається незмінним. Вимірюють напругу $U_2(f)$,

1. Етап – калібрування УП методом самовзаємності



2. Етап – калібрування гідрофона

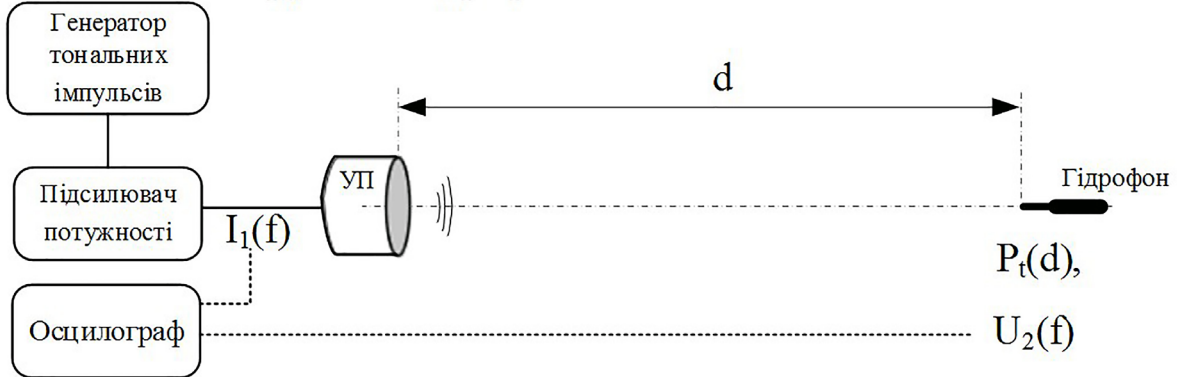


Рис. 1. Функціональна схема визначення чутливості гідрофона методом взаємності з двома перетворювачами

що виникає на виході гідрофона під дією створених УП ультразвукових коливань.

Відстань d , яку проходить ультразвуковий промінь на першому і на другому етапі, однакова. Її контролюють, вимірюючи на осцилографі час затримки t між прийнятим ультразвуковим сигналом (імпульсно-тональний сигнал) та випроміненим сигналом.

Передавальну характеристику гідрофона або чутливість $M_h(f)$ визначають, враховуючи вплив дифракційних втрат гідрофона G_2 та коефіцієнт шунтування $K_R(f)$:

$$M_h(f) = \frac{U_2(f)}{P_0(f) \cdot G_2} = \frac{U_2(f)}{G_2} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot G_1 \cdot e^{-ad}}{U_1(f) \cdot K_R(f)} \cdot \frac{2 \cdot A_{ER}}{I_1(f) \cdot \rho \cdot c}}, \quad (9)$$

де $U_2(f)$ – напруга гідрофона, В.

Під час вимірювання гідрофон та УП повинні знаходитись у вільному полі, тобто в звуковому полі, де вплив відбитих сигналів нехтовно малий. Гідрофон розміщують на вимірювальній відстані від поверхні УП, яка може бути в межах від $0,8N$ до $3N$, де N – протяжність ближнього поля допоміжного перетворювача. N розраховують для кожної частоти вимірювання за формулою:

$$N = \frac{a^2}{\lambda}, \quad (10)$$

де N – протяжність ближнього поля допоміжного перетворювача, м; λ – довжина звукової хвилі у воді на частоті вимірювання, м; a – ефективний радіус допоміжного перетворювача на частоті вимірювання, м.

Для реалізації методу калібрування на еталоні створено комплекс вимірювального та допоміжного обладнання [3], функціональну схему якого показано на рис. 2.

Координатно-поворотний пристрій позиціонування гідрофонів (КПППГ) складається з двох кареток із поворотними штангами, на які монтують УП та гідрофон, блоків керування БК-1 і БК-2 та програмного забезпечення “Acoustic etalon”. КПППГ призначений для просторового позиціонування у вимірювальній ємності на заданих відстанях один від одного (осі X, Y, Z, X2, Y2) та взаємного орієнтування УП та гідрофона (осі A, B, A2, B2) з метою суміщення їх акустичних осей.

Для генерування сигналу збудження УП використовують генератор AFG3021 та підсилювач потужності A150, які у парі формують імпульсно-тональний сигнал із синусоїдою у діапазоні від 1 до 10 МГц необхідної амплітуди (рис. 3). Мінімальну кількість періодів синусоїди в імпульсно-тональному сигналі розраховують за формулою:

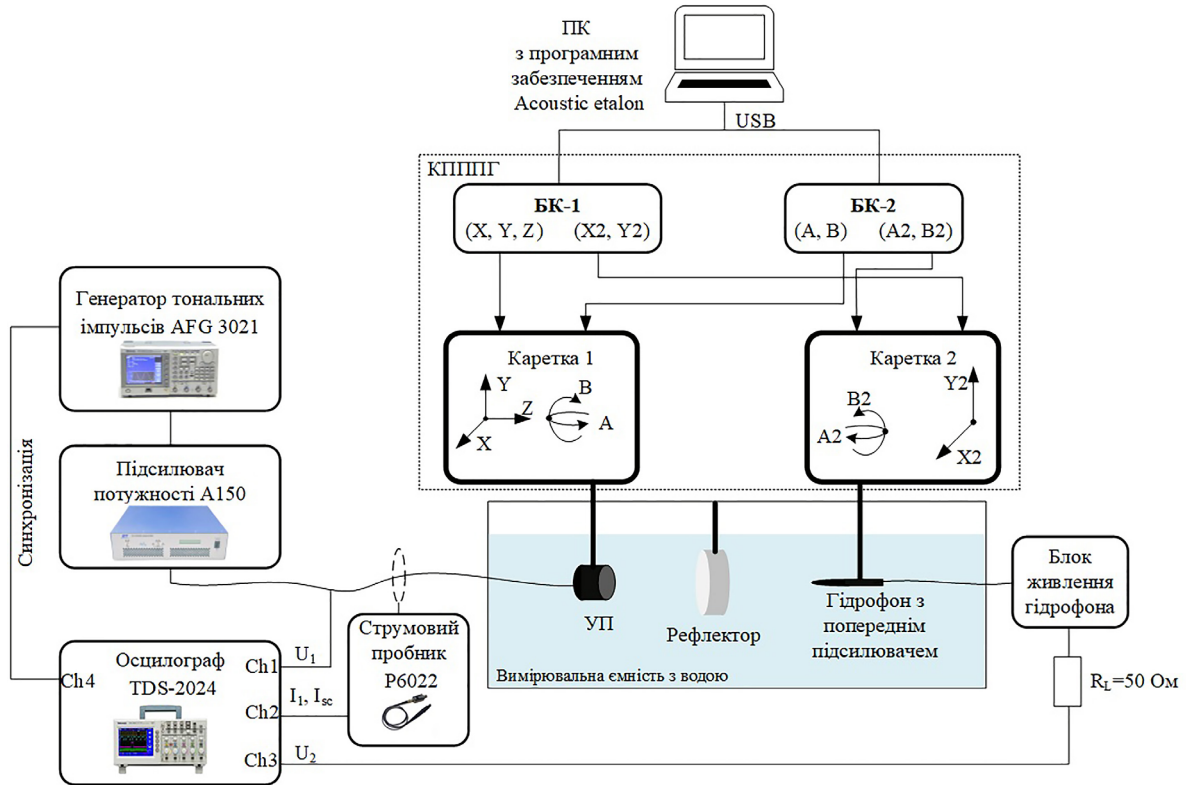


Рис. 2. Функціональна схема еталона НДЕТУ AUV-02-2018

$$n = \frac{D}{\lambda}, \quad (11)$$

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 (канал 2). Осцилографом TDS-2024 (канал 1) вимірюють напругу $U_1(f)$, створену на УП відбитим акустичним сигналом, та напругу гідрофона $U_2(f)$ (канал 3). Канал 4 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:

$$d = c \cdot t, \quad (12)$$

де c – швидкість звуку у воді, м/с.

Приклад вимірювальних сигналів $I_1(f)$, $U_2(f)$ зображено на рис. 3.

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

Для перевірки обраної математичної моделі калібрування та правильності функціонування вимірювального обладнання, на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 попередньо проведено калібрування двох голкових гідрофонів у комплекті із поперед-

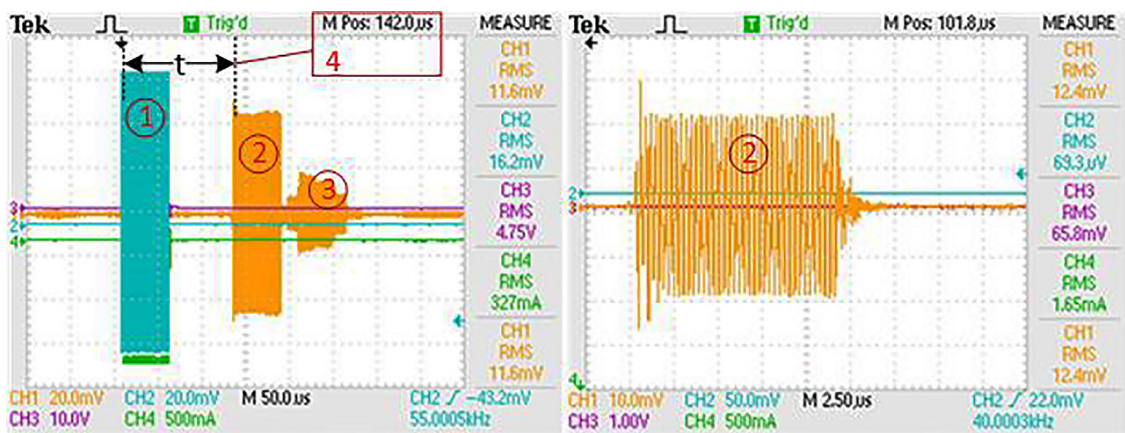


Рис. 3. Вимірювання за допомогою осцилографа TDS-2024: 1 – сигнали напруги та струму збудження $I_1(f)$ УП; 2 – сигнал напруги $U_2(f)$, отриманий з гідрофона; 3 – сигнал паразитного відбиття, виміряний гідрофоном; 4 – виміряне значення часу t для визначення відстані d

нім підсилювачем PA15044 та блоком DC-Coupler DCPS559:

- гідрофона фірми Precision acoustics діаметром 0,5 мм – № 2538 у частотному діапазоні від 1 до 10 МГц;

- гідрофона фірми Precision acoustics LTD діаметром 1 мм – № 2515 у діапазоні частот від 1 до 5 МГц.

Відповідно до обраної математичної моделі, для калібрування гідрофонів застосовували допоміжні УП зі складу еталона: УП типу E1025-SU, E2312-SU, E3512-SU та E9906-SU фірми MANA instruments. Допоміжні УП дозволяють формувати необхідні рівні ультразвукового тиску на відповідних частотах та забезпечують

співвідношення сигнал/шум не менше 20 дБ під час калібрування. Частоту, на якій застосовують УП, його ефективну площу A_{ER} , яку визначено окремо за допомогою растрового сканування [4], та розширену невизначеність вимірювання ефективної площі U_{AER} наведено у табл. 1.

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

Густина води ρ , кг/м³; c – швидкість звуку у воді, м/с; коефіцієнт згасання звуку у воді α , Гц⁻²·м⁻¹ – це параметри, які залежать від температури та частоти, їх розрахунок проводили відповідно до Додатку Е ІЕС 62127-2 [5]. Коефіцієнт

Таблиця 1

Результати визначення ефективної площі УП

Тип УП	Частота, МГц	Геометричний радіус, мм	A_{ER} , мм ²	Розширена невизначеність, U_{AER} , %
E1025-SU	1	12,5	366,58	3,5
E2312-SU	2	6,35	89,20	4,1
E3512-SU	3	6,35	104,14	4,5
	4	6,35	105,57	4,7
E9906-SU	5	3,0	23,87	3,9
	6	3,0	23,46	3,5
	7	3,0	23,49	3,9
	8	3,0	23,72	4,1
	9	3,0	23,18	3,9
	10	3,0	23,59	5,7

Таблиця 2

Результати калібрування 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_{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
$ua(M_h)$	%	2,2	1,6	1,8	1,2	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,4
$ub(M_h)$	%	2,60	2,65	2,69	2,71	2,63	2,60	2,63	2,65	2,63	2,83
$uc(M_h)$	%	3,41	3,10	3,23	2,95	3,47	3,33	3,23	3,21	3,08	3,16
$U(k=2)$	%	6,82	6,20	6,46	5,90	6,95	6,67	6,45	6,43	6,17	6,32

Результати калібрування гідрофона № 2515

УП		E1025-SU	E2312-SU	E3512-SU	E3512-SU	E9906-SM
N		1,0	2,0	2,0	2,0	2,0
F	МГц	1	2	3	4	5
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	В	0,369	0,164	0,656	0,804	0,67
K_R	–	18,160	8,698	2,565	3,344	1,763
I_{sc}	А	2,27	1,47	1,08	0,866	0,372
I_1	А	0,125	0,169	0,421	0,259	0,211
U_2	В	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
$u_a(M)$	%	2,8	2,3	2,0	3,0	2,3
$u_b(M)$	%	2,60	2,65	2,69	2,71	2,63
$u_c(M)$	%	3,82	3,51	3,35	4,07	3,48
$U(k=2)$	%	7,64	7,02	6,71	8,13	6,95

відбивання рефлектора k розраховали відповідно до Додатку А ІЕС TS 62903 [6]. Розрахунок коефіцієнтів дифракції G_1 та G_2 проводили за допомогою розробленого програмного забезпечення згідно з [7]. Результати вимірювання та розрахунку чутливості голкових гідрофонів № 2538 та № 2515 на еталоні НДЕТУ АUV-02-2018 включно із невизначеностями подані у табл. 2 та табл. 3 відповідно.

Згідно з обраною математичною моделлю калібрування складено бюджет невизначеності

відповідно до ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [8]. Приклад розрахунку бюджету невизначеності для гідрофона № 2515 на частоті 1 МГц наведено у табл. 4.

Після калібрування на еталоні НДЕТУ АUV-02-2018 два голкові гідрофони у комплекті із попереднім підсилювачем PA15044 та блоком DC-Coupler DCPS559 відправили на калібрування у НМІ Німеччини – Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Таблиця 4

Бюджет невизначеності

№	Джерело невизначеності	Границі похибки, %	Закон розподілу	Стандартна невизначеність, %	Коефіцієнт чутливості	Внесок, %
1	Струм УП $I_1(f)$	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}	5,7	нормальний	3,29	0,5	0,88
6	Густина води та швидкість звуку, ρc	2,2	прямокутний	1,27	0,5	0,64
7	Коефіцієнт відбивання k	0,1	прямокутний	1,25	0,5	0,03
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	$e^{-\alpha d}$	2,0	прямокутний	1,15	0,5	0,58
Сумарна невизначеність за типом В, $u_b(M_h)$, %						2,60
Сумарна невизначеність за типом А, $u_A(M_h)$, % (за результатами 10 спостережень)						2,8
Сумарна стандартна невизначеність, $u_c(M_h)$, %						3,82
Розширена невизначеність (за коефіцієнта розширення $k=2$, $P=0,95$), U , %						7,64

Метод та результати калібрування гідрофонів у РТВ

Голкові гідрофони № 2538 та № 2515 калібрували методом порівняння відповідно до стандарту ІЕС 62127-2 за допомогою опорних гідрофонів РТВ із застосуванням методу спектрометрії з часовою затримкою (TDS). Використовували опорні гідрофони такого ж типу, як і подані на калібрування, а саме 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 протягом 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 до 20 МГц. Сигнал із гідрофона подавався на попередній підсилювач PA15044 – блок DC-Coupler DCPS559 – навантаження 50 Ом, і вихідна напруга реєструвалася 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 проводили вимірювання та збереження на комп’ютері вихідного сигналу опорного гідрофона за частотної розгортки від 1 до 10 МГц з кроком 20 кГц.

Далі опорний гідрофон замінили на калібрований, розмістили у ту ж саму точку ви-

мірювання, провели його вирівнювання та вимірювання за процедурами, які застосовували для опорного гідрофона.

Після чого провели розрахунок чутливості гідрофона за допомогою комп’ютера, з урахуванням частотно-залежних корегувальних коефіцієнтів на просторове усереднення, розрахованих з урахуванням номінального діаметра каліброваного гідрофона, і ефективного діаметра, отриманого на основі вимірювань діаграми спрямованості для опорного гідрофона.

Результати калібрування голкових гідрофонів № 2538 та № 2515 та відповідні значення розширеної невизначеності подано у табл. 5.

Верифікація отриманих результатів калібрування

Зведені результати калібрування (включно з розширеними невизначеностями) голкових гідрофонів № 2538 та № 2515 у ДП НДІ “Система” (Україна) та РТВ (Німеччина) подано на рис. 4 та 5 відповідно.

Для оцінювання результатів калібрування гідрофонів розраховують опорне значення вимірювань x_{ref} відповідно до формули [9]:

$$x_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n u^2(x_i)}, \quad (13)$$

де x_i – результати калібрування гідрофонів, надані лабораторіями (НМІ), n – кількість калібрувальних лабораторій, $u(x_i)$ – стандартні невизначеності, надані калібрувальними лабораторіями.

Стандартну невизначеність опорного значення $u(x_{ref})$ розраховують за формулою [9]:

Таблиця 5

Результати калібрування гідрофонів № 2538 та № 2515 у РТВ

Гідрофон	№ 2538		№ 2515	
	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
2	212,72	10,54	707,95	10,54
3	200,60	10,25	653,87	10,25
4	183,65	10,25	615,19	10,25
5	158,46	10,25	661,24	10,25
6	171,62	10,23	–	–
7	174,76	10,23	–	–
8	177,38	10,23	–	–
9	184,25	10,23	–	–
10	187,58	10,23	–	–

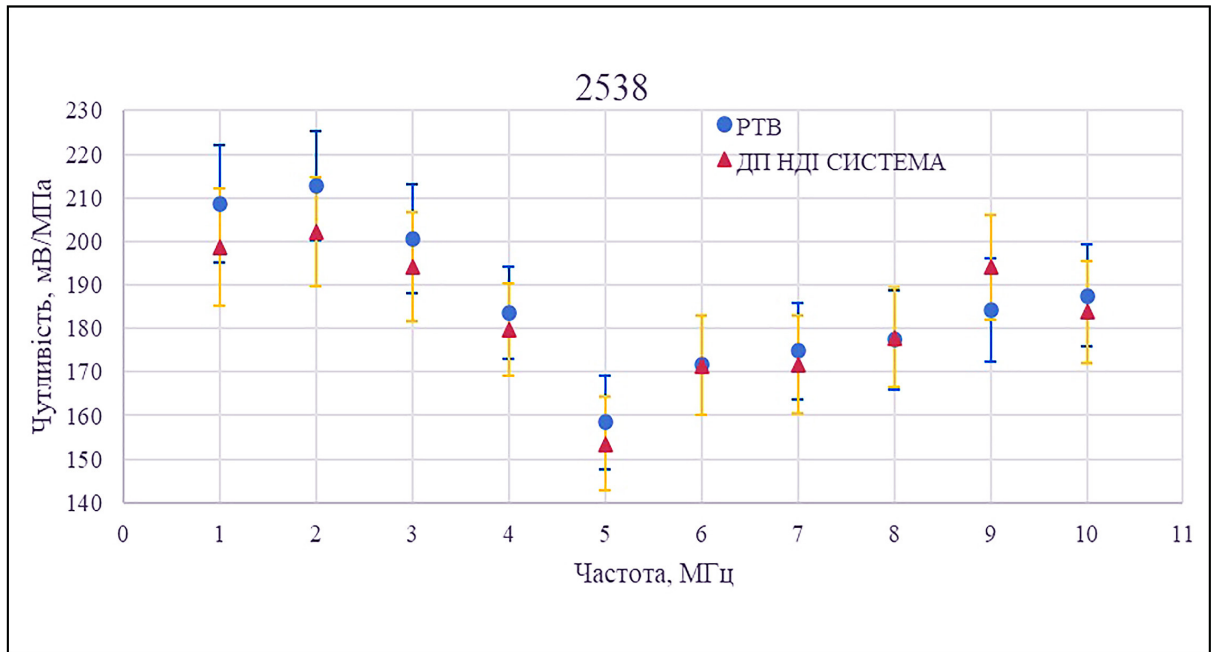


Рис. 4. Результати калібрування гідрофона № 2538 (1 мм) з невизначеністю в НМІ РТВ (Німеччина) та в ДП НДІ "Система" (Україна)

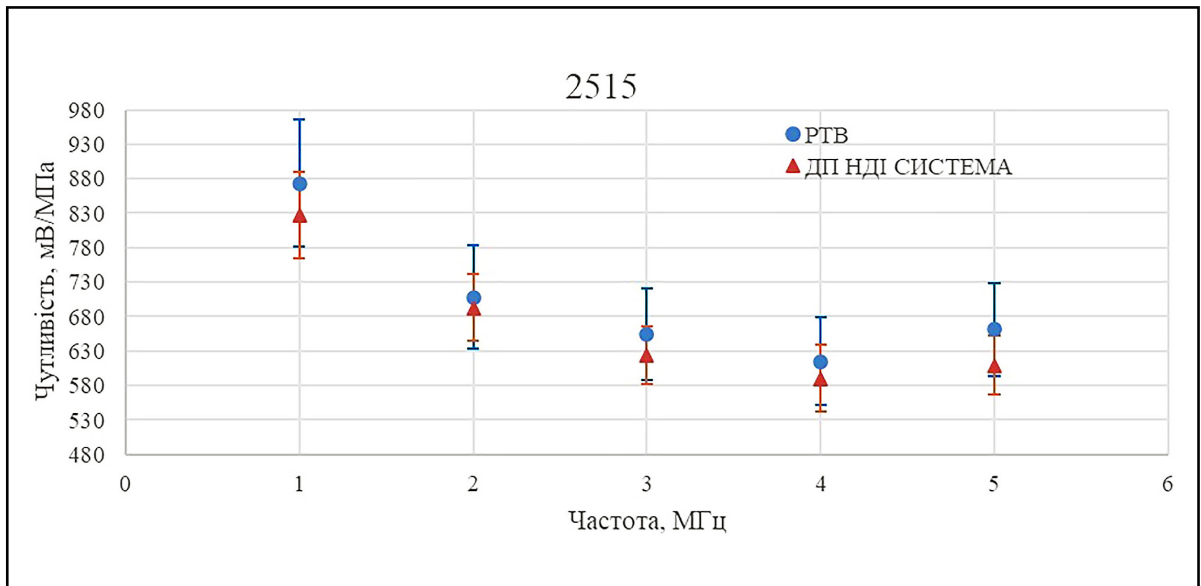


Рис. 5. Результати калібрування гідрофона № 2515 (0,5 мм) з невизначеністю в НМІ РТВ (Німеччина) та у ДП НДІ "Система" (Україна)

$$u(x_{ref}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{u^2(x_i)}}} \quad (14)$$

За результатами калібрувань та відповідних стандартних невизначеностей x_i , $u(x_i)$ розраховують значення критерію χ^2 за формулою [9]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_{ref})^2}{u^2(x_i)} \quad (15)$$

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 $n-1$ [9], тобто

$$\chi^2 < \chi_{0.95}^2(n-1), \quad (16)$$

тоді результати калібрування лабораторіями вважають узгодженими.

Для результатів калібрування, які увійшли у множину узгоджених даних і використовуються для обчислення опорного значення, застосовують наступну процедуру верифікації даних: якщо для результату калібрування x із стандартною невизначеністю $u(x)$ виконується умова [9]:

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 7

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

$$E_n = \frac{|x - x_{ref}|}{2 \cdot \sqrt{u^2(x) - u^2(x_{ref})}} < 1, \quad (17)$$

тоді стандартна невизначеність, яка заявлена лабораторією НМІ, становить:

$$u(comparison) = u(x). \quad (18)$$

Якщо для результату калібрування x із стандартною невизначеністю $u(x)$ умова (17) не виконується, тоді мінімальну стандартну невизначеність, заявлену лабораторією НМІ, треба збільшити згідно з [9]:

$$u(comparison) = \sqrt{\frac{(x - x_{ref})^2}{4} + u^2(x_{ref})}. \quad (19)$$

Відповідно, розширена невизначеність становить $U_{0,95}(comparison) = 2 \cdot u(comparison)$.

Результати верифікації результатів калібрування для гідрофонів № 2538 та № 2515 подані у табл. 6 та 7 відповідно.

Згідно з розрахунками, наведеними у табл. 6 та 7, результати калібрування голкових гідрофонів на еталоні НДЕТУ AUV-02-2018 узгоджуються з результатами, наданими РТВ (Німеччина), тобто виконується умова (16), а заявлені стандартні невизначеності результатів калібрування ДП НДІ “Система” не потребують коригування відповідно до умови (18), оскільки розрахований параметр E_n у діапазоні частот від 1 до 10 МГц менший за 1, а отже, умову (17) виконано.

Висновок

Калібрування голкових гідрофонів у НМІ Німеччини РТВ дозволило перевірити вимірювальні та калібрувальні можливості еталона НДЕТУ АУВ-02-2018 і є підготовкою до майбутніх міжнародних звірень з еталонами інших країн.

Порівняння результатів калібрування голкових гідрофонів № 2115 та № 2538 показало добре узгодження результатів вимірювання у діапазоні частот від 1 до 10 МГц та підтвердило достовірність результатів калібрування голкових гідрофонів на еталоні НДЕТУ АУВ-02-2018 з використанням обраного методу калібрування та вимірювального обладнання.

Verification of the results of the calibration of needle hydrophones on the measurement standard NDETU AUV-02-2018

O. Shpak¹, D. Duviriak²

¹ Lviv Polytechnic National University, Bandery Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine
lesykshpak@gmail.com

² SE NDI "SYSTEMA", Kryvonosa Str., 6, 79008, Lviv, Ukraine
dardar2410@gmail.com

Abstract

The results of the verification of the calibration of needle hydrophones using the national primary measurement standard of the unit of ultrasonic pressure in the aquatic environment (NDETU AUV-02-2018) are presented. The main objective of the study was to confirm the accuracy of the calibration of needle hydrophones No. 2538 and No. 2515 by comparison with the calibration results obtained on the measurement standard at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Germany.

The paper describes the calibration methods used by laboratories to determine the sensitivity of hydrophones, including the two-transducer reciprocity method and the comparison method. The results of the calibration of needle hydrophones in the frequency range from 1 to 10 MHz obtained by the National Metrology Institute of Germany (PTB) and Ukraine (SE Research Institute "Systema") were evaluated. Furthermore, the level of uncertainty of the calibration results was compared.

The results of the study demonstrated a high degree of consistency in the measurement results. Added to this, the results confirmed the reliability of the results of the calibration of needle hydrophones using the NDETU AUV-02-2018 measurement standard by the calibration method selected and with the measurement equipment used.

The conclusions confirmed the effectiveness of using the national measurement standard NDETU AUV-02-2018 and its conformity with international measurement standards, thus increasing the confidence in the results at the international level. Additionally, the study provides the ground for future international comparisons with measurement standards of other countries.

Keywords: ultrasound; hydrophone; calibration; reciprocity method; comparison method; verification of results.

Список літератури

1. Ludwig G., Brendel K. Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 1988, vol. 35, issue 2, pp. 168–174. doi: 10.1109/58.4167
2. Bobber R.J. General reciprocity parameter. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1966, vol. 39, pp. 680–687.
3. Дувіряк Д.В., Шпак О.В., Паракуда В.В. Еталон одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2019. Т. 80. Вип. 3. doi: 10.23939/istcmtm2019.03.058
4. Shpak O., Duviriak D., 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, no. 1, pp. 44–50. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258819>
5. IEC 62127-2:2007/AMD2:2017. Amendment 2 - Ultrasonics - Hydrophones - Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz.
6. IEC TS 62903:2023. Ultrasonics - Measurements of electroacoustical parameters and acoustic output power of spherically curved transducers using the self-reciprocity method.
7. Fay B. Numerical Calculation of the Diffraction Losses in the Sound Field of an Ultrasonic Transducer. *Acta Acustica united with Acustica*, 1976, vol. 36, no. 3, pp. 209–213.
8. ДСТУ-Н РМГ 43:2006. Метрологія. Застосування. Посібники з вираження невизначеності вимірювань (РМГ 43-2001, IDT).
9. Cox M.G. The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset. *Metrologia*, 2007, vol. 44, pp. 187–200. doi: 10.1088/0026-1394/44/3/005

References

1. Ludwig G., Brendel K. Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 1988, vol. 35, issue 2, pp. 168–174. doi: 10.1109/58.4167
2. Bobber R.J. General reciprocity parameter. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1966, vol. 39, pp. 680–687.
3. Duviriak D., Shpak O., Parakuda V. Etalon odynytsi ultrazvukovogo tysku u vodnomu seredovyshchi [The standard of unit of ultrasonic pressure in aqueous medium]. *Measuring Equipment and Metrology*, 2019, vol. 80, no. 3 (in Ukrainian). doi: 10.23939/istcmtm2019.03.058
4. Shpak O., Duviriak D., 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, no. 1, pp. 44–50. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258819>
5. IEC 62127-2:2007/AMD2:2017. Amendment 2 - Ultrasonics - Hydrophones - Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz.
6. IEC TS 62903:2023. Ultrasonics - Measurements of electroacoustical parameters and acoustic output power of spherically curved transducers using the self-reciprocity method.
7. Fay B. Numerical Calculation of the Diffraction Losses in the Sound Field of an Ultrasonic Transducer. *Acta Acustica united with Acustica*, 1976, vol. 36, no. 3, pp. 209–213.
8. DSTU-N RMG 43:2006. Metrology. Application. Guides to the expression of measurement uncertainty (RMG 43-2001, IDT) (in Ukrainian).
9. Cox M.G. The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset. *Metrologia*, 2007, vol. 44, pp. 187–200. doi: 10.1088/0026-1394/44/3/005