

Wyzwania naukowe rozwoju infrastruktury metrologicznej w obszarze offshore w Polsce

Karol Listewnik, Janusz Mindykowski

Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

Streszczenie: Rozwój metod badań środowiska morskiego oparty na akustyce podwodnej, wymiana danych, służących m.in. do modelowania i mapowania badanego środowiska spowodowały konieczność określenia ich jakości tj. wiarygodności i powtarzalności pozyskiwanych danych. Podstawową metodą określenia jakości sprzętu pomiarowego i aparatury badawczej jest ich wzorcowanie z użyciem odpowiedniej, dostępnej z określoną regularnością, infrastruktury metrologicznej. Z powodu braku takiej infrastruktury w Polsce, Główny Urząd Miar rozpoczął prace nad jej pozyskaniem.

Słowa kluczowe: infrastruktura metrologiczna, wzorcowanie, akustyka podwodna, aparatura badawcza

1. Wprowadzenie

Inicjatywa rozpoczęcia prac nad budową infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej została zainicjowana w Głównym Urzędzie Miar (GUM) w 2017 r. Powodem były docierające do GUM sygnały od Marynarki Wojennej RP, instytucji badawczych (w tym uczelni wyższych), urzędów (m.in. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska) i firm komercyjnych zajmujących się badaniami z użyciem sprzętu hydroakustycznego, o potrzebie uwiarygodnienia czujników ciśnienia i aparatury używanej do badań w obszarze akustyki podwodnej, poprzez ich wzorcowanie i wydanie odpowiedniego świadectwa przez uprawnioną instytucję.

Instytucje te wskazywały, że korzystanie z usług zagranicznych laboratoriów metrologicznych jest utrudnione z uwagi na długie, nawet kilkumiesięczne przerwy w korzystaniu z czujników i aparatury akustyki podwodnej skierowanej do wzorcowania lub przez konieczność posiadania dodatkowej wzorcowanej aparatury, która byłaby używana w miejsce aparatury wysłanej do wzorcowania. W związku z tym w GUM powstała Grupa Robocza ds. Akustyki Podwodnej [1], która rozpoczęła prace nad uzasadnieniem biznesowym i zakresem budowy infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM (w Polsce) wraz z wybranymi elementami infrastruktury metrologicznej, jak sprzęgacz akustyczny do wzorcowania hydrofonów w zakresie małych częstotliwości [2].

Dalsze prace koncentrowały się m.in. na analizie ekonomicznej i identyfikacji potrzeb budowy infrastruktury metrologicznej w Polsce. W tym celu przygotowano i rozesłano ankietę adre-

sowaną do kilkunastu instytucji, urzędów i firm zajmujących się badaniami morza metodami hydroakustycznymi i/lub produkującymi aparaturę w tym obszarze. Odpowiedzi uzyskane z tej ankiety jednoznacznie wskazywały na potrzebę rozpoczęcia działań związanych z rozpoczęciem prac umożliwiających określenie zakresu, kosztów i wyposażenia metrologicznego przed rozpoczęciem budowy właściwej infrastruktury metrologicznej. Z ankiety wynikało, że szacowane koszty wzorcowania czujnika hydroakustycznego (hydrofonu) w GUM są obecnie około 3- a nawet 4-krotnie niższe niż za granicą, co powinno się przełożyć na wzrost konkurencyjności nie tylko krajowego laboratorium względem zagranicznych laboratoriów, ale i instytucji naukowych i komercyjnych świadczących usługi bazujące na wykorzystaniu czujników i urządzeń akustyki podwodnej. W związku z umiejscowieniem Laboratorium Akustyki Podwodnej w Gdyni Witomino (na terenie Wydziału Zamiejscowego nr 3 Okręgowego Urzędu Miar w Gdańsku – WZ3 OUM Gdańsk), w bliskim sąsiedztwie najważniejszych krajowych instytucji związanych z badaniami morza metodami hydroakustycznymi należy spodziewać się, że czas wzorcowania czujnika lub aparatury pomiarowej ulegnie skróceniu do dwóch tygodni.

2. Zadania badawcze

Określenie zakresu i kosztów budowy infrastruktury metrologicznej nastąpiło w ramach projektu „Koncepcja budowy infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM”, dla którego konsorcjum w składzie Uniwersytet Morski w Gdyni (UMG – lider projektu), Politechnika Gdańska (PG) i Uniwersytet Gdański (UG) uzyskało dofinansowanie w ramach konkursu Polska Metrologia. Projekt został zrealizowany w latach 2022–2023. Obecnie w tym samym partnerstwie (UMG – lider, PG, UG) realizowany jest w latach 2024–2026 projekt „Opracowanie elementów infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej GUM” w ramach konkursu Polska Metrologia II. Zadania w tych projektach zostały podzielone na związane z badaniami naukowymi, jak i zadania inżyniersko-admini-

Autor korespondujący:

Karol Listewnik, k.listewnik@we.umg.edu.pl

Artykuł recenzowany

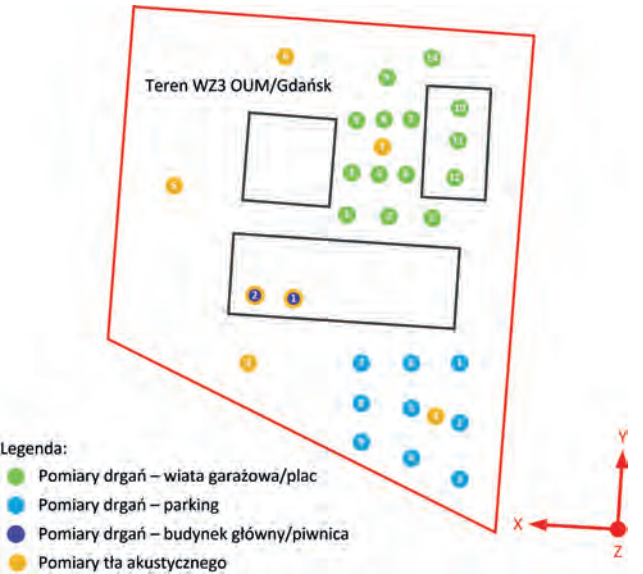
nadesłany 14.02.2026 r., przyjęty do druku 10.07.2026 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

stracyjne. W pierwszym projekcie Polskiej Metrologii zadania badawcze były następujące:

1. Badania sejsmiczne gruntu na terenie WZ3 OUM Gdańsk oraz określenie wpływu zakłóceń zewnętrznych na konstrukcje basenów pomiarowych;
2. Analiza rozwiązań podobnych basenów do wzorcowania hydrofonów i urządzeń hydroakustycznych oraz materiałów dźwiękochłonnych;
3. Badania modelowe metodami elementów skończonych kształtu basenów i materiałów dźwiękochłonnych;
4. Badania doświadczalne w basenie pomiarowym wybranych materiałów dźwiękochłonnych;
5. Opracowanie koncepcji budowy infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM.



Rys. 1. Położenie punktów pomiarowych z oznaczonymi kierunkami osi czujników drgań

Fig. 1. Location of measurement points with the designated axes of the vibration sensors

Ad 1. Badania sejsmiczne gruntu wykonano na terenie Okręgowego Urzędu Miar w Gdańsku w Wydziale Zamiejscowym zlokalizowanym w Gdyni w przewidywanym miejscu posadowienia basenów pomiarowych, stanowiących istotną część infrastruktury metrologicznej. Celem było określenie wpływu zakłóceń zewnętrznych pochodzących od otoczenia na konstrukcję projektowanych basenów pomiarowych Laboratorium Akustyki Podwodnej w wyznaczonych miejscach planowanej budowy. Pomiary były przeprowadzone w środku geometrycznym każdego wybranego pomieszczenia na podłodze (piwnica budynku

Tabela 1. Zestawienie najwyższych z zarejestrowanych wartości drgań podłoża, bez dodatkowego wymuszenia kinematycznego
Table 1. Summary of the highest recorded ground vibration values, without additional kinematic excitation

Lokalizacja	prędkość drgań $\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ mm/s	kryterium mm/s
Pomieszczenie piwnicy 01	0,012	0,1
Pomieszczenie piwnicy 02	0,013	
Parking przed WZ3	0,014	
Plac przed wiatą	0,014	
Wiata (wewnątrz)	0,011	

głównego, pomieszczenia nr 01 oraz 02, posadzka betonowa) oraz wewnątrz wiaty garażowej (również posadzka betonowa), w dostępnych podczas pomiaru miejscach. Przetworniki drgań były umieszczone na stalowej płycie obciążeniowej o łącznej masie 7 kg. Pomiary na zewnątrz zostały przeprowadzone na powierzchni asfaltu, który jest jednolity i występuje zarówno na powierzchni parkingu, jak i placu przyległym do wiaty garażowej. Kierunki wszystkich mierzonych drgań zorientowano zgodnie z ułożeniem budynku głównego. Rozmieszczenie punktów pomiarowych drgań i punktów pomiarowych tła akustycznego przedstawiono na rysunku 1.

Z uwagi na brak norm dotyczących budowy hydroakustycznych basenów pomiarowych, wyniki pomiarów drgań sejsmicznych podłoża w miejscach przeznaczonych pod budowę basenów pomiarowych oceniono według kryteriów zawartych w normie PN-B-02170:2016-12P. Kryteria oceny drgań oparto na podstawie założenia występowania w budynku urządzeń precyzyjnych (klasa wrażliwości I – bardzo wrażliwe na wpływy dynamiczne). W tabeli 1 zestawiono najwyższe z zarejestrowanych wartości drgań dla poszczególnych lokalizacji, w zestawieniu z wartością kryterialną podaną w ww. normie. Stanowią one wartości sumy geometrycznej prędkości drgań dla trzech kierunków drgań, wyrażone w mm/s. Pomiary, których wyniki zawarte są w tabeli 1 odbywały się bez żadnego dodatkowego wymuszenia kinematycznego drgań.

Zmierzone wartości drgań podłoża (tabela 1) dla każdej z lokalizacji spełniają założone kryterium. Dla proponowanych dwóch lokalizacji budowy basenu wielkogabarytowego nie istnieją istotne różnice między wartościami drgań podłoża. W przypadku basenu małogabarytowego różnice między wynikami pomiarów również są porównywalne. Zatem ostateczny dobór lokalizacji może wynikać głównie ze względów użytkowych bądź projektowo-architektonicznych. Ze względu na nieco niższe wartości prędkości drgań dla pozycji Wiaty (wewnątrz) oraz wygodniejszy dostęp w czasie budowy (Miejsce 1 osłania budynek biurowo-laboratoryjny, co może utrudniać dostęp do tej lokali-



Rys. 2. Wizualizacja wariantów posadowienia basenu wielkogabarytowego (basen WG) na terenie WZ3 OUM Gdańsk
Fig. 2. Visualization of foundation options for the large-scale pool (WG pool) at the WZ3 site of the Gdańsk Regional Office of Measures (OUM Gdańsk)

zacji w czasie prac budowlanych), wybrano lokalizację basenu wielkogabarytowego, która odpowiada Miejsu 2 na rys. 2 [3].

Ad 2. Analiza rozwiązań podobnych basenów, przeznaczonych do wzorcowania hydrofonów i urządzeń hydroakustycznych oraz materiałów dźwiękochłonnych została opracowana w formie raportu [4], który posłużył do opracowania kształtu i wymiarów basenów pomiarowych, w celu przeprowadzenia badań modelowych metodami elementów skończonych (zespół Politechniki Białostockiej) oraz metodą impulsową (zespół Politechniki Gdańskiej). Analiza ta obejmowała m.in. studium na temat znaczenia niezawodności i powtarzalności wyników badań urządzeń hydroakustycznych przez zapewnienie odpowiednich standardów wzorcowania. Sformułowano rekomendacje dotyczące właściwych procedur w tym zakresie w powiązaniu przykładowymi urządzeniami wzorcującymi uznanych instytucji międzynarodowych. Szczególną uwagę zwrócono na porównanie niepewności wzorcowania, badanych zakresów częstotliwości oraz metod wzorcowania. Wnioski odniesiono do planowanej w ramach projektu Polska Metrologia i opracowywanej w ramach projektu Polska Metrologia II metrologicznej infrastruktury pomiarowej do badań podwodnych. Zakres sformułowanych wniosków dotyczy typu obiektów badawczych, sposobu ich wykorzystania w badaniach podwodnych wraz z określeniem odnośnego zakresu częstotliwości i metody wzorcowania. Szczegółowe informacje dotyczące wyników badań zrealizowanych w ramach zadania badawczego numer 2 można znaleźć w publikacji [5].

Ad 3 i 4. Zadania badawcze nr 3 i 4 są ze sobą związane, i dotyczą badań właściwości tłumiących różnych materiałów dźwiękochłonnych oraz optymalnego wyboru elementów warstwy tłumiącej i rozpraszającej pod kątem ich wykorzystania do konstrukcji hydroakustycznych basenów pomiarowych (zadanie 3), a następnie do badań modelowych metodami elementów skończonych kształtu basenów i materiałów dźwiękochłonnych (zadanie 4). Ważne informacje dotyczące realizacji tych zadań badawczych można znaleźć w publikacjach [6, 7], sygnowanych przez członków konsorcjum realizującego projekty Metrologia Polska i Metrologia Polska II. Z kolei szczegółowe wyniki dotyczące realizacji zadania badawczego 4 przedstawiono w obszernym raporcie [8], z których część omówiono w niniejszej publikacji w rozdziale Modelowanie wielkogabarytowego basenu pomiarowego.

Ad 5. Opracowanie powyższych zagadnień miało wpływ na ostateczną wizję, zakres prac w zakresie budowy i wyposażenia oraz szacowanie kosztów wykonania infrastruktury metrologicznej. Elementy tej infrastruktury doprecyzowano i zdefiniowano w ramach szeregu zadań inżynierijno-technicznych, szczegółowo przedstawionych w pracach [9, 10]. Zadania te dotyczą m.in. opracowania wstępnego projektu technicznego basenów bezdechowych, opracowania projektu technicznego infrastruktury metrologicznej położonych na otwartych akwenach słodkowod-

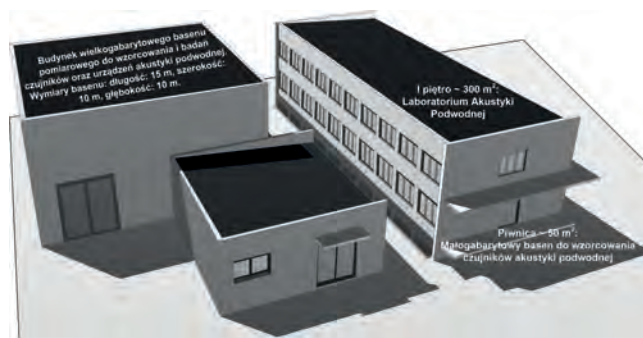
nych i morskich, a także wyposażenia metrologicznego niezbędnego do wzorcowania czujników i urządzeń hydroakustycznych oraz opracowanie Programu Funkcjonalno-Użytkowego (PFU) infrastruktury budowlanej i basenów pomiarowych przyszłego Laboratorium Akustyki Podwodnej, wraz ze Studium Wykonalności (SW) całego przedsięwzięcia. Ze sporządzonego PFU i SW wynika, że największy koszt (około połowy budżetu projektu) jest spowodowany budową wielkogabarytowego basenu pomiarowego o wymiarach 15 m długości, 10 m szerokości i 10 m głębokości. Prace badawcze związane z budową tego basenu, a zwłaszcza modelowaniem jego kształtu przedstawiono w dalszej części artykułu. Wizualizację elementów budowlanej infrastruktury metrologicznej na terenie WZ3 OUM Gdańsk opartej na PFU i Studium Wykonalności zaprezentowano na rys. 3.

3. Modelowanie wielkogabarytowego basenu pomiarowego

Określenie zaleceń do badań modelowych wykonano na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej literatury oraz doświadczeń własnych uczestników projektu.

Ogólnie, na podstawie doświadczeń praktycznych z wykonywania rozmaitych zadań pomiarowych różnych przyrządów i urządzeń akustyki podwodnej w zróżnicowanych warunkach, można stwierdzić, co następuje:

- Podstawowym warunkiem uzyskania wysokiej precyzji i powtarzalności pomiarów (np. pomiarów kalibracyjnych hydrofonów) jest wyeliminowanie z ośrodka, w którym są prowadzone pomiary, możliwości powstawania interferencji fal akustycznych, czyli nakładania się właściwych sygnałów pomiarowych z jakimikolwiek sygnałami ech od ścian i dna basenu oraz od powierzchni wody;
- Sygnały pasożytniczych ech, nawet przytłumionych, są na ogół niestabilne i przez to szkodliwe dla pomiarów w warunkach, w których występują interferencje;
- Należy też eliminować możliwość prowadzenia pomiarów w polu bliskim ze względu na szybką zmienność (a przez to przestrzenną niestabilność) wartości mierzonego ciśnienia akustycznego w tym polu. Trzeba uwzględnić, że pole bliskie może powstawać nie tylko przed powierzchnią promieniującą, ale też przed przeszkodą odbijającą;
- Z powyższych uwag wynika brak możliwości prowadzenia precyzyjnych pomiarów z falami ciągłymi;
- Do pomiarów należy stosować impulsy o małej długości przestrzennej względem minimalnej odległości elementu zaangażowanego w pomiar od powierzchni odbijającej (nawet wytłumionej);
- Należy pamiętać, że pomiary dla rzeczywiście małych częstotliwości (np. dla metrowych długości fal i w związku z tym odpowiednio długimi impulsami) są wykonywane w otwartych i dostatecznie głębokich akwenach – w naszych warunkach w terenowym laboratorium na jeziorze Wdzydze. Nie mamy praktycznych doświadczeń z ewentualnymi pomiarami niskoczęstotliwościowymi w odpowiednikach audioakustycznych rur wypełnianych pochłaniającym dźwięk materiałem;
- Dla hydroakustycznych basenów pomiarowych idealne wytłumienie to warstwa rozpraszająca (w rodzaju gęsto rozmieszczonych poziomo cienkich włókien) rozwieszona na warstwie mocno tłumiącej o impedancji akustycznej Z zbliżonej do oporności akustycznej wody $1\,475\,664\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, czyli około 1,5 MRa (megarayli).
- Pomiary należy wykonywać koniecznie z oscyloskopowym podglądem geometrycznego rozmieszczenia impulsów nadawanych, odbieranych oraz sygnałów ech dla kontroli i ewentualnej eliminacji pasożytniczych interferencji fal podczas pomiarów;



Rys. 3. Wizualizacja elementów budowlanej infrastruktury metrologicznej na terenie WZ3 OUM Gdańsk

Fig. 3. Visualization of structural metrological infrastructure elements at the WZ3 OUM Gdańsk site

- Przy projektowaniu konstrukcji wytłumienia basenu należy uwzględnić możliwości łatwego montażu i demontażu warstw tłumiących i/lub rozpraszających na ścianach, dnie i powierzchni wody w celu umożliwienia koniecznych zabiegów naprawczych, czyszczenia itp.;
- Bardzo pomocnym przyrządem zapewniającym czystość wody jest pływający po powierzchni „odkurzacz” filtrujący wodę;
- Ośrodki zajmujące się incydentalnie pomiarami hydroakustycznymi zamawiają wykonanie basenów z żywicy epoksydowych lub poliestrowych u wytwórców basenów ogrodowych. Pomijając szczegóły, baseny te są na ogół głębsze od typowych ogrodowych oraz nieznany jest wpływ mat i tkanin zatopionych w żywicach epoksydowych lub poliestrowych na tłumienie, rozpraszanie i pochłanianie dźwięków.

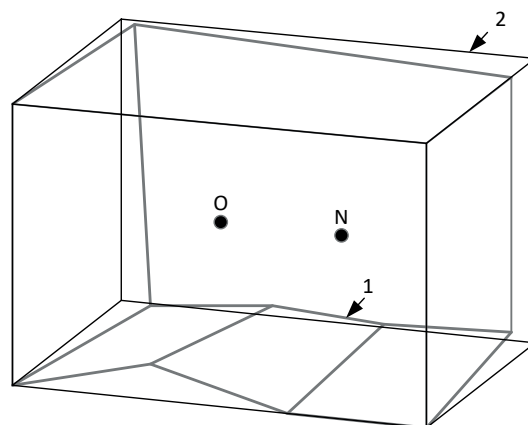
Zespół realizujący zadanie modelowania wielkogabarytowego basenu pomiarowego składał się z przedstawicieli Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, Politechniki Gdańskiej, Uniwersytetu Gdańskiego oraz Instytutu Innowacji i Technologii Politechniki Białostockiej Sp. z o.o. – wytypowanej w przetargu do realizacji „Badań modelowych metodami elementów skończonych (MES) i/lub brzegowych (MEB) kształtu basenów i materiałów dźwiękochłonnych celem uzyskania właściwości bezechowych basenów pomiarowych”. Zespół opracował założenia modeli badawczych oraz brał udział w ocenie i dyskusji na temat materiałów dźwiękochłonnych oraz sposobu konstrukcji ścian basenu, w celu zapewnienia jak najniższego sygnału echa w trakcie wykonywania prac w basenie.

W ramach realizacji zadania prof. dr hab. inż. Roman Salamon z PG zaproponował wykonanie modelowania metodą odpowiedzi impulsowej, która znajduje szerokie zastosowanie w architekturze, a zwłaszcza w projektowaniu sal koncertowych. W przypadku basenu pożądana jest również płaska funkcja przenoszenia, czyli skrócenie czasu odpowiedzi impulsowej, lecz dotyczy to położenia źródła dźwięku i jego odbiornika. Konieczne jest także wydłużenie czasu między momentem odebrania sygnału bezpośredniego i momentem odbioru pierwszego sygnału echa. W tym przedziale czasu można dokonywać pomiarów metodą impulsową, przy czym im czas ten jest dłuższy, tym dokładniej można mierzyć sygnały o niższych wartościach częstotliwości.

Zespół Instytutu Innowacji i Technologii Politechniki Białostockiej Sp. z o.o. (dr inż. R. Dobosz i prof. dr hab. inż. Krzysztof Kurzydłowski) zastosował analizę rozchodzenia się fal w basenie z wykorzystaniem elementów skończonych dedykowanych do tego typu zadań. Były to elementy FLUID220 oraz FLUID221 w oprogramowaniu firmy ANSYS, którym również posługiwano się przy podziale wody w basenie na elementy skończone. Maksymalna liczba elementów wykorzystanych w analizowanych modelach wynosiła 6,5 mln (15 mln węzłów).

Wielkość stosowanych elementów dostosowywano do antycypowanych przebiegów propagacji fal. Należy przy tym podkreślić, że ANSYS zaleca, aby liczba elementów przypadających na długość fali wynosiła od 5 do 10, zależnie od stosowanych wielomianów aproksymujących. W analizowanych modelach wykorzystywane były elementy wyższego rzędu, a liczba elementów przypadających na długości fali zawierała się pomiędzy 6 a 10.

Modele basenów przedstawiono na rys. 4. Modele te opracowano na podstawie danych przekazanych przez Uniwersytet Morski w Gdyni. Ustalono odległość między nadajnikiem a odbiornikiem akustycznym wynoszącą 5 m i w takiej samej odległości znajdowały się ściany, dno i powierzchnia wody dla basenu o kształtach prostokątnych. Jako zasadniczą formę basenu przyjęto basen o ścianach nierównoległych (oznaczony nr 1 na rys. 4). Dodatkowo przeprowadzone zostały, w uzgodnieniu ze Zleceniodawcą, analizy dla basenu prostopadłościennego „rozpiętego” na obrysie basenu, przedstawionego jako nr 2 na rys. 4. Analizy te miały na celu sprawdzenie wpływu nierówno-



Rys. 4. Model geometryczny basenu: 1 – wielkogabarytowego o ścianach nierównoległych; 2 – prostopadłościennego rozpiętego na wielkogabarytowym basenie; N – nadajnik fali akustycznej w wodzie; O – odbiorca sygnału akustycznego w wodzie

Fig. 4. Geometric model of the pool: 1 – large-scale pool with non-parallel walls; 2 – rectangular-prism-shaped pool spanning the large-scale pool; N – underwater acoustic wave transmitter; O – underwater acoustic signal receiver

ległości ścian basenu zasadniczego na tłumienie fal w miejscu umieszczenia odbiornika. W obliczeniach uwagę skoncentrowano na przypadku emisji jednego impulsu (jednej pełnej sinusoidy).

W toku realizacji pracy przeprowadzono obliczenia i analizy następujących modeli:

1. Basen duży ze ścianami o współczynniku $\alpha = 0$ – częstotliwość 1 kHz;
2. Basen duży ze ścianami o współczynniku $\alpha = 75$ – częstotliwość 1 kHz;
3. Basen prostopadłościenny ze ścianami o współczynniku $\alpha = 0$ – częstotliwość 1 kHz;
4. Basen prostopadłościenny ze ścianami o współczynniku $\alpha = 75$ – częstotliwość 1 kHz;
5. Basen prostopadłościenny z pokrywą o współczynniku $\alpha = 75$ – częstotliwość 1 kHz;
6. Basen duży ze ścianami o współczynniku $\alpha = 0$ – częstotliwość 1 kHz – różne położenia odbiornika;
7. Basen prostopadłościenny ze ścianą pokrytą piramidkami (współczynnik $\alpha = 0$ – częstotliwość 1 kHz);
8. Basen prostopadłościenny ze ścianą pokrytą piramidkami (współczynnik $\alpha = 75$ – częstotliwość 1 kHz);
9. Basen duży z lewą ścianą wklęsłą (współczynnik $\alpha = 0$ – częstotliwość 1 kHz);
10. Basen duży z lewą ścianą wypukłą (współczynnik $\alpha = 0$ – częstotliwość 1 kHz);
11. Basen duży ze ścianami o współczynniku $\alpha = 0$ – częstotliwość 3 kHz.

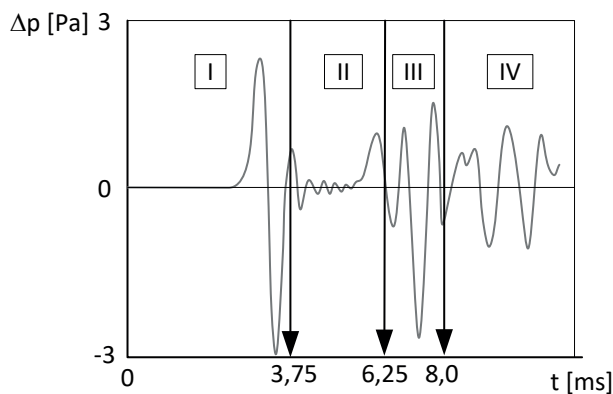
Wartość współczynnika pochłaniania dźwięku $\alpha = 0,75$ przyjęto na podstawie literatury i odzwierciedla ona możliwy do pozyskania materiał absorbujący dźwięk w wodzie dla badanych częstotliwości. Ze względu na obszerność opracowania [8] w artykule przywołano tylko wybrane elementy badań. Zmianę ciśnienia w miejscu lokalizacji odbiornika w zależności od czasu, dla modelu basenu z nierównoległymi ścianami przy braku tłumienia, $\alpha = 0$, przy częstotliwości 1 kHz pokazuje wykres na rys. 5. Uwzględniając warunki pomiarowe w miejscu lokalizacji odbiornika, szczególne znaczenie mają obszary I, II i III.

- Dla czasów krótszych od 3,75 ms – obszar I na lewo od strzałki między obszarami I i II – w miejscu lokalizacji odbiornika rejestrowany jest sygnał odpowiadający charakterystyce przebiegu ciśnienia w funkcji czasu wygenerowa-

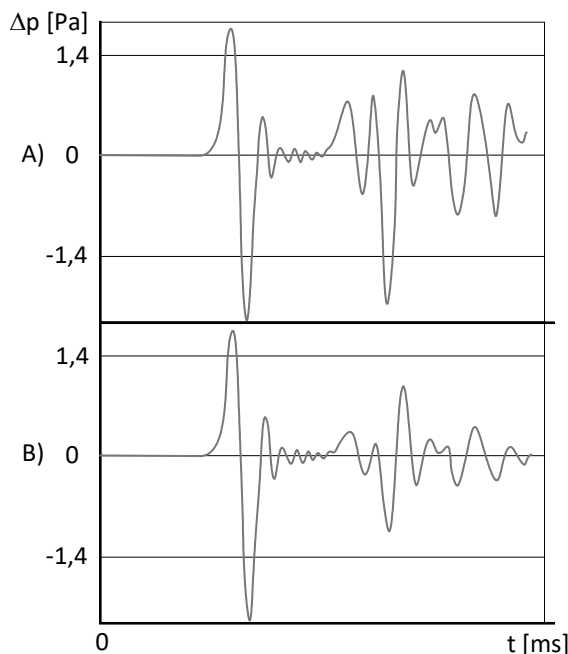
nemu impulsowi, tyle że znacznie mniej intensywny. Iloraz amplitudy fali wygenerowanej do wartości pierwszego maksimum sygnału odbieranego wynosi około 0,021 (2,41 %).

- Dla czasów od 3,75 ms do 6,25 ms – obszar II (separacji sygnału użytecznego od niepożądanych ech wtórnych) od strzałki między obszarami I i II do strzałki między obszarami II i III – w miejscu lokalizacji odbiornika rejestrowane są sygnały odbite od ścian basenu.
- Dla czasów od 6,25 ms do 8,0 ms – obszar III od strzałki między obszarami II i III do strzałki między obszarami III i IV – w miejscu lokalizacji odbiornika rejestrowane są sygnały odbite od kolejnych ścian i dna basenu a także od powierzchni wody w basenie.

Porównanie charakteru przebiegów czasowych ciśnienia w miejscu lokalizacji odbiornika uzyskanych w modelowaniu MES basenu bez tłumienia oraz z tłumieniem $\alpha = 0,75$ przedstawiono na rys. 6 oraz łącznie z lewą ścianą basenu w kształcie piramidek na rys. 7.



Rys. 5. Zmiany ciśnienia w miejscu lokalizacji odbiornika w funkcji czasu od momentu wygenerowania impulsu falowego
Fig. 5. Pressure changes at the receiver location as a function of time elapsed since the generation of the wave pulse

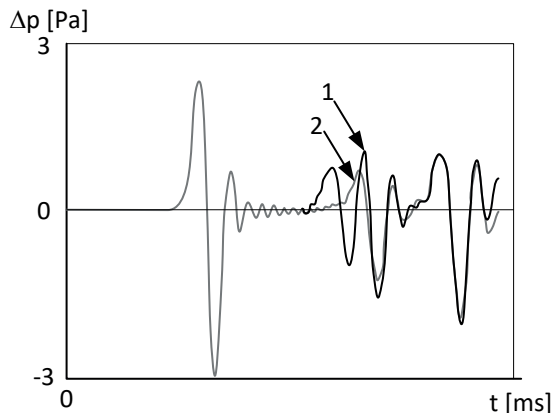


Rys. 6. Graficzne porównanie charakteru przebiegów czasowych ciśnienia w miejscu lokalizacji odbiornika uzyskanych w modelowaniu MES basenu A) bez tłumienia oraz B) z tłumieniem $\alpha = 0,75$
Fig. 6. Graphical comparison of the nature of time-pressure courses at the receiver location, obtained from FEM modeling of the basin: A) without damping and B) with damping $\alpha = 0.75$

Wyniki przedstawione na rys. 7 wskazują, że zastosowanie topografii w formie piramidek dla przypadku ścian o właściwości opisanych współczynnikiem tłumienia $\alpha = 0,75$ przy częstotliwości 1 kHz, w widoczny sposób obniża amplitudę zmian ciśnienia rejestrowanych w miejscu lokalizacji odbiornika oraz wydłuża czas do pojawienia się efektów odbicia fali od ścian basenu.

Wyniki uzyskane za pomocą Metody Elementów Skończonych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków odnoszących się do efektów hydroakustycznych w basenie projektowanym przez UMG:

1. W miejscu lokalizacji odbiornika występują wtórne sygnały hydroakustyczne na skutek odbicia się fal od ścian i dna basenu, a także od powierzchni wody, których amplituda ciśnienia w przypadku braku tłumienia sięga 3/4 amplitudy pierwotnego sygnału docierającego do odbiornika bezpośrednio z nadajnika.
2. Sygnały wtórne co do wartości amplitudy są zbliżone do tych, które wystąpiłyby w miejscu pierwotnej lokalizacji odbiornika w basenie prostopadłościennym „opisanym” na wierzchołkach zaprojektowanego basenu.
3. Wielkość amplitudy sygnałów wtórnych w miejscu lokalizacji odbiornika ulega istotnej redukcji w przypadku tłumienia sygnałów hydroakustycznych na ścianach i dnie basenu. Dla współczynnika tłumienia $\alpha = 0,75$ maksymalna amplituda sygnałów wtórnych jest o około 50 % niższa od maksymalnej amplitudy sygnałów wtórnych w przypadku braku tłumienia.
4. Wielkość amplitudy sygnałów wtórnych może ulec zmniejszeniu w przypadku odsunięcia odbiornika (w stosunku do pierwotnie założonego położenia) od płaskich ścian basenu.
5. Przyjęcie niepłaskiej geometrii obu dłuższych ścian basenu skutkuje obniżeniem amplitudy ciśnienia sygnałów wtórnych docierających do odbiornika.
6. Na wielkość amplitudy sygnałów wtórnych mierzalny wpływ ma topografia powierzchni ścian basenu, przy czym rozważana topografia w formie piramidek o wysokości 0,5 m na płaskiej ścianie basenu redukuje sygnały wtórne w małym stopniu.
7. Przebieg ciśnienia w funkcji czasu od momentu wygenerowania impulsu o częstotliwości 3 kHz, w miejscu lokalizacji odbiornika, jest podobny jak dla częstotliwości 1 kHz. Główna różnica między oboma przebiegami polega na trzykrotnym skróceniu okresu generowanego impulsu falowego, co jest wynikiem różnic w generowanych wartościach częstotliwości nadajnika.



Rys. 7. Porównanie sygnałów w miejscu lokalizacji odbiornika dla basenu prostopadłościennego z topografią ściany w formie układu piramidek; przy: 1 – braku współczynnika tłumienia; 2 – z przyjętym współczynnikiem tłumienia 0,75
Fig. 7. Comparison of signals at the receiver location for a rectangular pool with a wall topography consisting of an array of pyramids: 1 – without a damping coefficient; 2 – with an assumed damping coefficient of 0.75

4. Podsumowanie

W omawianych działaniach zmierzających do opracowania infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej zaawansowane badania naukowe realizowane w projektach programu Polska Metrologia i Polska Metrologia II posłużyły do opracowania Programu Funkcjonalno-Użytkowego ze wszystkimi szczegółami technicznymi oraz do oszacowania kosztów dotyczących budowy przyszłego Laboratorium Akustyki Podwodnej oraz Studium Wykonalności, które to dokumenty są podstawą do opracowania wniosku o finansowanie docelowej infrastruktury metrologicznej.

Zdaniem jej autorów, wielkogabarytowy basen pomiarowy jest elementem o fundamentalnym znaczeniu dla realizowanych projektów Metrologia Polska i Metrologia Polska II, i dlatego zagadnienia modelowania i realizacji technicznej tego obiektu są główną osią przedłożonego artykułu. Przedstawione zagadnienia modelowania zarówno geometrii basenu, jak i przebiegów czasowych badanych fal akustycznych dla różnych warunków tłumienia, są zdeterminowane wcześniejszymi wynikami badań uzyskanym w ramach realizacji zadań badawczych 1, 2 i 3, i wyznaczają one kierunki rozwoju metrologicznej infrastruktury pomiarowej przeznaczonej do badań środowiska morskiego w Polsce. Wnioski płynące z modelowania mają kluczowe znaczenie dla technicznej realizowalności i ekonomicznej efektywności przyszłego Laboratorium Akustyki Podwodnej [11].

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że zbudowane modele wielkogabarytowego basenu pomiarowego mogą być pomocne do przeprowadzenia dodatkowych analiz zjawisk akustycznych mających wpływ na wzorcowanie czujników i aparatury stosowanych w akustyce podwodnej, które byłyby przedmiotem osobnych badań.

Podziękowania

Publikacja w ramach projektu finansowanego ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą Wektory Nauki nr projektu WNK/SP/0311/2025/01 kwota finansowania projektu: 276 232,00 zł całkowita wartość projektu: 635 552,00 zł.

Wyniki badań umieszczone w artykule zostały sfinansowane z następujących projektów: Projektu pt.: „Koncepcja budowy infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM” w ramach konkursu Polska Metrologia, zrealizowanego w latach 2022–2023, PM/SP/0057/2021/1. Kwota dofinansowania projektu: 1 000 000,00 zł oraz z projektu pt.: „Opracowanie elementów infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM” w ramach konkursu Polska Metrologia II, zrealizowanego w latach 2024 - 2026, PM-II/SP/0049/2024/02. Kwota dofinansowania projektu: 990 000,00 zł.

Bibliografia

1. Listewnik K., Dobrowolska D., *Development of Metrological Infrastructure in the Field of Underwater Acoustics in Poland*, “Proceedings of 2018 Joint Conference Acoustics”, 2018 Joint Conference – Acoustics, Ustka, Poland, 2018, DOI: 10.1109/ACOUSTICS.2018.8502282.
2. Listewnik K., *A design of an acoustic coupler for calibration of hydrophones at low frequencies*, “Vibrations in Physical Systems”, Vol. 30, No. 1, 2019.
3. Praca zbiorowa, Raport Badania RS-2023/B-011, *Wyniki pomiarów drgań sejsmicznych gruntu na terenie Wydziału Zamiejscowego 3 Okręgowego Urzędu Miar w Gdańsku*, Projekt: Koncepcja budowy infrastruktury metrologicznej

4. Praca zbiorowa, Załącznik nr 2 Zadanie 2 – Raport z analizy literatury, Projekt: *Koncepcja budowy infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM*, Politechnika Gdańska i Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia, 2023.
5. Listewnik K., Mindykowski J., *Study on the Ensuring of Reliability and Repeatability of Research in the Area of Marine Ecology through Calibration of Underwater Acoustics Devices*, “Applied Sciences”, Vol. 14. No. 17, 2024, DOI: 10.3390/app14177725.
6. Schmidt A., Kilian L., Marszał J., *Experimental tests of selected damping and sound-absorbing materials to determine their suitability for sound attenuation of hydroacoustic measuring tank*, “Vibrations in Physical Systems”, Vol. 35, 2024, DOI: 10.21008/j.0860-6897.2024.1.13.
7. Salamon R., Marszał J., Kochańska I., *A tool for designing water tanks for measuring hydroacoustic transducers*, “Vibrations in Physical Systems”, Vol. 35, 2024, DOI: 10.21008/j.0860-6897.2024.1.09.
8. Dobosz R., Kurzydłowski K., Wykonanie „Badań modelowych metodami elementów skończonych (MES) i/lub brzegowych (MEB) kształtu basenów i materiałów dźwiękochłonnych celem uzyskania właściwości bezechowych basenów pomiarowych”, Raport Instytutu Innowacji i Technologii Politechniki Białostockiej Sp. z O.O. na zamówienie Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, 2023.
9. Błaszak W., Anczakowski P., Projekt Funkcjonalno-Użytkowy. Zadanie: Modernizacja budynku biurowo-laboratoryjnego i budowa dwóch basenów pomiarowych: wielkogabarytowego o wymiarach 10×15×10 w oddzielnym budynku oraz małogabarytowego 3×4×3 w pomieszczeniu piwnicy istniejącego budynku zlokalizowanego na terenie Wydziału Zamiejscowego w Gdyni (WZ3) Okręgowego Urzędu Miar w Gdańsku ul. Słoneczna 59A, 81-605 Gdynia-Witomino, Projekt: Koncepcja budowy infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM, Wojciech Błaszak Architekt, Poznań, 2023.
10. Praca zbiorowa, Studium wykonalności: Budowy infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM, Projekt: Koncepcja budowy infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w GUM, Centrum Kształcenia Sektora Publicznego, Warszawa, 2023.
11. Listewnik K., Mindykowski J., *The project “A concept for constructing metrological infrastructure in underwater acoustics area at the Central Office of Measures” – assumptions and scope of the project tasks*, “Metrology & Hallmark”, Vol. 29, No. 4, 2024.

Scientific Challenges of Development Metrological Infrastructure in the Offshore Area in Poland

Abstract: The development of marine environmental research methods based on underwater acoustics and the exchange of data used, among other things, for modeling and mapping the studied environment have necessitated the assessment of their quality, i.e., the reliability and repeatability of the acquired data. The primary method for determining the quality of research equipment and apparatus is their calibration using appropriate, regularly available metrological infrastructure. Due to the lack of such infrastructure in Poland, the Central Office of Measures has begun work on acquiring it.

Keywords: metrological infrastructure, calibration, underwater acoustics, research equipment

dr inż. Karol Listewnik

k.listewnik@we.umg.edu.pl
ORCID: 0000-0003-3322-7247

Absolwent Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej (1989), doktorat na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej (2002) w zakresie diagnostyki maszyn elektrycznych. W latach 1989–1996 służył w Marynarce Wojennej na stanowisku kierownika Stacji Kontrolno-Pomiarowej Pola Hydroakustycznego Okrętu Poligonu Kontrolno-Pomiarowego Marynarki Wojennej, a następnie, do 2016 r., był nauczycielem akademickim w Akademii Marynarki Wojennej na Wydziałach: Mechaniczno-Elektrycznym oraz Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego, zajmując się hydroakustyką i elektroenergetyką okrętową. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta badawczo-dydaktycznego w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zagadnień diagnostyki okrętowego systemu elektroenergetycznego oraz prac związanych z rozwojem infrastruktury metrologicznej w obszarze akustyki podwodnej w Głównym Urzędzie Miar w ramach programu MEiN, gdzie jest kierownikiem projektów Polska Metrologia I (2022–2023) i Polska Metrologia II (2024–2026).



prof. dr hab. inż., dr h.c. Janusz Mindykowski

j.mindykowski@we.umg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5359-0433

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej (1974), stopień naukowy doktora uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej (1981), a doktora habilitowanego – na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej (1993). W 2002 r. otrzymał tytuł naukowy profesora nauk technicznych. Od 1976 r. związany jest z Katedrą Elektroenergetyki Okrętowej Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, którą kieruje od 1994 r. Jest twórcą międzynarodowej szkoły naukowej w obszarze badań i oceny jakości energii elektrycznej, a jego główne zainteresowania naukowe skoncentrowane są na zagadnieniach efektywnej eksploatacji i diagnostyki systemów okrętowych oraz kształceniu wysokokwalifikowanych kadr morskich zgodnie z międzynarodowymi standardami. Aktywnie uczestniczy w działalności krajowych i międzynarodowych organizacji naukowych: członek Komitetu Metrologii i Aparatury Pomiarowej PAN (2003–2015), członek Rady Metrologii przy Głównym Urzędzie Miar (od 2017), przewodniczący Polish Chapter IEE, Fellow Member (1994–2013); przewodniczący Instrumentation & Measurement Section, IEEE Polish Chapter (2008–2012, IEEE Life Senior Member 2025), przewodniczący IMEKO Technical Committee on Measurement of Electrical Quantities (2012–2015). Od 2006 r. jest profesorem honorowym Shanghai Maritime University w Chinach, a w 2018 r. otrzymał tytuł Doktora Honoris Causa „George Asachi” Technical University of Iasi w Rumunii.

