

dr hab. inż. WITOLD MIKULSKI (ORCID: 0000-0002-2387-9631)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

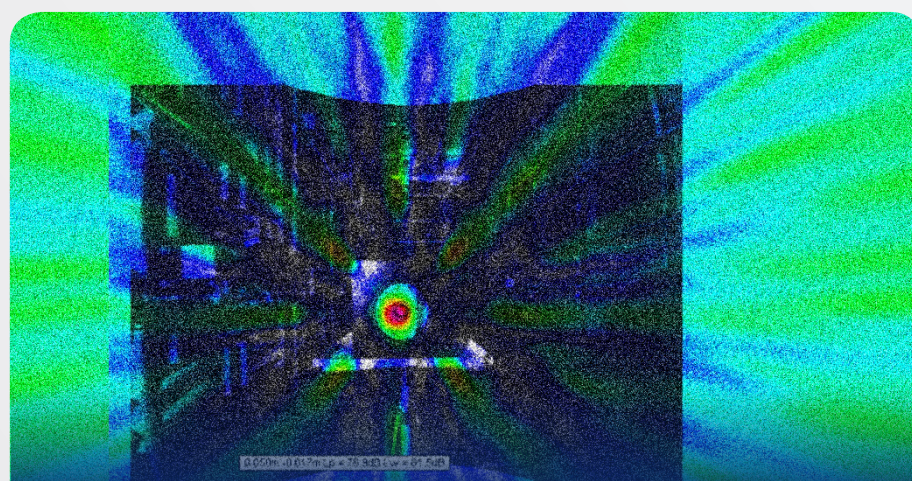
Kontakt: wimik@ciop.pl

DOI: 10.54215/BP.2021.9.3

# Obudowy dźwiękochłonno-izolacyjne urządzeń ultradźwiękowych, ograniczające poziom hałasu przenikającego do środowiska

## Wyniki badań własnych

Fot. G. Szczepeński, W. Mikulski



W artykule omówiono rozwiązania techniczne obudów dźwiękochłonno-izolacyjnych przeznaczonych do urządzeń będących źródłami hałasu ultradźwiękowego (częstotliwości dźwięku 10-40 kHz). Ze względu na zagrożenie zdrowia pracowników obsługujących technologiczne urządzenia ultradźwiękowe oraz fakt, że znajdują się one blisko tych urządzeń, konieczne jest zastosowanie skutecznego środka zmniejszającego to zagrożenie, jakim są obudowy dźwiękochłonno-izolacyjne. Dotychczas nie określono jednak ani zasad stosowania takich obudów, ani właściwości dźwiękoizolacyjnych i dźwiękochłonnych ich materiałów w tym zakresie częstotliwości. W artykule zaprezentowano wyniki badań własnych, dotyczących wpływu materiałów, z których są wykonywane obudowy, zastosowanej wyściółki oraz obecności otworów w obudowach na poziom hałasu emitowanego przez urządzenia ultradźwiękowe, który przenika do środowiska.

**Słowa kluczowe:** obudowy dźwiękochłonno-izolacyjne, izolacyjność akustyczna, hałas ultradźwiękowy

### Sound-absorbing and insulating enclosures for ultrasonic devices reducing the level of noise penetrating the environment. Own research results

The article discusses the technical solutions of sound-absorbing and sound-insulating enclosures for devices that are sources of ultrasonic noise (sound frequencies range of 10-40 kHz). Due to the high health risk of employees operating ultrasonic technological devices and the fact that they are in close proximity to these devices, it is necessary to use an effective measure to reduce this risk, i.e. sound-insulating enclosures. So far, however, the rules for the use of such casings and the sound-insulating and sound-absorbing properties of their materials (in this frequency range) have not been defined. The article presents the results of own research on the impact of the materials used to make enclosures, linings of casings and the presence of openings (hole) in casings on the level of noise emitted by ultrasonic devices that penetrates into the environment.

**Keywords:** soundproofed and sound-insulating enclosure, sound power insulation, ultrasonic noise

## Wstęp

Najbardziej skutecznym sposobem ograniczenia hałasu emitowanego do środowiska przez maszyny i urządzenia jest umieszczenie ich w obudowach dźwiękochłonno-izolacyjnych [1-4]. Dość liczną grupę obudów dźwiękochłonno-izolacyjnych (dalej w skrócie nazywanych obudowami dźwiękoizolacyjnymi) stanowią obudowy o konstrukcji szkieletowej. Ich konstrukcja nośna (szkielet) może być wykonana z ceowników, kątowników, profili zamkniętych lub innych, odpowiednio ukształtowanych, do niej zaś przymocowane są ścianki [3]. Skuteczność akustyczna obudów jest określona zmniejszeniem poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku emitowanego przez źródło bez obudowy w stosunku do dźwięku emitowanego przez źródło w obudowie [3, 4]. W przypadku gdy drgania mechaniczne emitowane przez źródło nie przenoszą się na obudowę i podłoże, skuteczność akustyczna obudowy zależy od: izolacyjności akustycznej jej ścian, właściwości materiału dźwiękochłonnego zastosowanego wewnątrz obudowy oraz jej szczelności. Wielkością fizyczną określającą skuteczność obudowy jest izolacyjność akustyczna [1-3].

Przy projektowaniu obudowy pod względem akustycznym uwzględnia się tzw. wymaganą izolacyjność akustyczną, która zależy od tego, o ile należy obniżyć hałas w środowisku pracy [3]. Jest ona różnicą poziomu ciśnienia akustycznego w środowisku, np. na stanowisku pracy, od źródła dźwięku bez obudowy i dopuszczalnego poziomu ciśnienia akustycznego [5, 6]. Na podstawie określonej wymaganej izolacyjności akustycznej obudowy oblicza się wymaganą izolacyjność akustyczną elementów składowych (ścianek). Ten proces projektowania obudowy dźwiękoizolacyjnej jest powszechnie znany i można go prześledzić np. w publikacji Z. Engela i J. Sikory [3]. Niestety, taki proces projektowania nie znajduje obecnie zastosowania w odniesieniu do redukcji hałasu ultradźwiękowego (zakresu częstotliwości dźwięku obejmującego tercjowe pasmo częstotliwości o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz [5, 6]). Podstawową tego przyczyną jest brak

danych na temat właściwości dźwiękochłonnych i dźwiękoizolacyjnych materiałów w tym zakresie częstotliwości. Wielu producentów i użytkowników urządzeń ultradźwiękowych stosuje (z różnym skutkiem) samodzielnie wykonane (i dobrane metodą prób i błędów) obudowy dźwiękoizolacyjne, które zazwyczaj są jedynym sposobem na ograniczenie hałasu ultradźwiękowego [7-9].

W artykule opisano wyniki własnych badań laboratoryjnych nad izolacyjnością akustyczną obudów szkieletowych w zakresie częstotliwości dźwięków hałasu ultradźwiękowego. Wyniki te można wykorzystać w procesie projektowania obudów dźwiękoizolacyjnych, ograniczających poziom hałasu ultradźwiękowego [9-13]. Wskazano cztery czynniki, które mogą mieć wpływ na izolacyjność akustyczną obudowy: rodzaj materiału, z którego wykonano jej ścianki, grubość tych ścianek, zastosowanie odpowiedniego materiału dźwiękochłonnego wewnątrz obudowy oraz szczelność obudowy.

## Wielkości określające właściwości dźwiękoizolacyjne obudowy

Do określania izolacyjności akustycznej obudowy stosuje się dwie wielkości: izolacyjność akustyczną mocową i izolacyjność akustyczną ciśnieniową [2, 4, 10-13]. Izolacyjność akustyczna mocowa stanowi różnicę poziomu mocy akustycznej źródła hałasu bez obudowy i w obudowie [2, 4, 10, 14, 15] i jest podstawowym parametrem charakteryzującym właściwości akustyczne obudowy. Natomiast izolacyjność akustyczną ciśnieniową definiuje się jako różnicę poziomu ciśnienia akustycznego – źródła hałasu z obudową i bez niej – w wybranym punkcie referencyjnym, np. na stanowisku pracy [2, 4, 10, 16]. Gdy źródło emituje hałas wszechkierunkowo, a obudowa jest jednorodna, wtedy oba parametry mają zbliżone wartości (różnica wynika z tłumienia dźwięku w powietrzu). W przypadku obudowy niejednorodnej akustycznie (albo wykonanej z różnych materiałów, albo posiadającej otwór bądź nieszczelnej) i/lub silnych właściwości dźwiękochłonnych wewnątrz obudowy [17, 18] jej izolacyjność akustyczna ciśnieniowa zależy właśnie od tych czynników oraz od położenia punktu referencyjnego (w większości przypadków ten punkt znajduje się na stanowisku pracy). Przykładowo, w przypadku obudowy w kształcie sześcianu pozabawionego jednej ściany izolacyjność akustyczna mocowa jest taka sama, niezależnie od tego, której z pięciu ścian obudowy brakuje [10]. Izolacyjność akustyczna ciśnieniowa będzie zaś najmniejsza w punktach referencyjnych, z których widoczne jest (przez brak ściany) źródło hałasu. Z tak przyjętych definicji izolacyjności akustycznych obudowy wynika, że do porównywania skuteczności obudów dźwiękoizolacyjnych pod względem redukcji emisji hałasu do środowiska, w tym do wstępnego projektowania akustycznego, bardziej przydatna jest izolacyjność akustyczna mocowa, natomiast określenie wpływu konkretnego źródła hałasu na dane stanowisko pracy wymaga także uwzględnienia izolacyjności akustycznej ciśnieniowej.

Izolacyjność akustyczną ciśnieniową wzięto pod uwagę – obok izolacyjności akustycznej mocowej – w tej części badań, w której analizowano wpływ nieszczelności obudowy na jej izolacyjność akustyczną.

Izolacyjność akustyczna zależy od częstotliwości. Efektywność zastosowania obudowy dźwiękoizolacyjnej należy uwzględnić w całym zakresie częstotliwości, w którym określone są wartości dopuszczalne hałasu, tj. w zakresie częstotliwości hałasu ultradźwiękowego (zawierającego tercjowe pasma częstotliwości o częstotliwościach środkowych: 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz, 36 kHz i 40 kHz [5, 6]). W artykule określono ją dodatkowo w tercjowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 8 kHz i 50 kHz.

Izolacyjność akustyczna mocowa  $D_{w,f}$  jest różnicą poziomu mocy akustycznej źródła dźwięku bez obudowy i w obudowie. Poziomy poziom mocy akustycznej w obudowie i bez obudowy określa się za pomocą tego samego wzoru [14, 15], więc po prostych przekształceniach [13] izolacyjność akustyczną mocową obudowy oblicza się jako różnicę średnich wartości, na półkuli powierzchni pomiarowej nad płaszczyzną odbijającą dźwięk, poziomów ciśnienia akustycznego  $L'_{p,f}$  (lub różnicę poziomów mocy akustycznej  $L_{w,f}$ ) dla źródła dźwięku: bez obudowy i w obudowie. W artykule określa się ją w tercjowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych (8 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz, 40 kHz i 50 kHz), w dB, ze wzoru (przez analogię do [10]):

$$D_{w,f} = \overline{L'_{p,bez\ obudowy,f}} - \overline{L'_{p,w\ obudowie,f}} + K_{1,w,obudowie,f} \quad (1)$$

gdzie:

$\overline{L'_{p,bez\ obudowy,f}}$ ,  $\overline{L'_{p,w\ obudowie,f}}$  – średni poziom ciśnienia akustycznego, na powierzchni pomiarowej od źródła dźwięku (w tercjowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ ), odpowiednio bez obudowy i w obudowie, w dB  
 $K_{1,w,obudowie,f}$  – poprawka uwzględniająca wpływ hałasu tła podczas pomiarów źródła dźwięku w obudowie (w tercjowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ ), w dB.

**Uwaga!** Przytoczona definicja odnosi się do rozpatrywanego zakresu częstotliwości. W przypadku częstotliwości poniżej 8 kHz, gdy izolacyjność akustyczna jest mniejsza od ok. 10 dB, we wzorze (1) należałoby uwzględnić poprawkę  $K_{1,bez\ obudowy,f}$

Średni poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej (w przypadku określania go zarówno dla źródła w obudowie, jak i bez obudowy, oraz określania tła akustycznego), oblicza się w dB, w tercjowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych  $f$  (8 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz, 40 kHz i 50 kHz), korzystając ze wzoru [10]:

$$\overline{L'_{p,f}} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{0,1 L'_{p,j,f}} \right) \quad (2)$$

gdzie:

$n$  – liczba punktów pomiarowych  
 $L'_{p,j,f}$  – poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej w punkcie o numerze  $j$ , w tercjowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , w dB.

Poprawkę uwzględniającą hałas tła,  $K_{1,w,obudowie,f}$  oblicza się w dB, w tercjowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych  $f$  (8 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz, 40 kHz i 50 kHz) ze wzorów [10]:

$$K_{1,w,obudowie,f} = 0 \quad \text{dla } \overline{L_{p,zr,f}} - \overline{L_{p,tlo,f}} > 15 \text{ dB}$$

$$K_{1,w,obudowie,f} = -10 \log(1 - 10^{-0,1(\overline{L_{p,zr,f}} - \overline{L_{p,tlo,f}})}) \quad \text{dla } 3 \text{ dB} \leq \overline{L_{p,zr,f}} - \overline{L_{p,tlo,f}} \leq 15 \text{ dB}$$

$$K_{1,w,obudowie,f} = ? \quad \text{dla } \overline{L_{p,zr,f}} - \overline{L_{p,tlo,f}} < 3 \text{ dB} \quad (3)$$

gdzie:

$\overline{L_{p,zr,f}}$  – średnia wartość poziomu ciśnienia akustycznego, w tercjowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , na powierzchni pomiarowej, podczas gdy źródło dźwięku emituje dźwięk – wartość obliczana ze wzoru (2), w dB,

$\overline{L_{p,tlo,f}}$  – średnia wartość poziomu ciśnienia akustycznego, w tercjowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , na powierzchni pomiarowej, podczas gdy źródło dźwięku nie emituje dźwięku – wartość obliczana ze wzoru (2), w dB

? – wartości poprawki nie da się określić wystarczająco dokładnie, a zatem nie można uwzględnić wpływu tła akustycznego.

Kwalifikację możliwości przeprowadzenia pomiarów w pomieszczeniu badawczym wykonuje się na podstawie obliczonej poprawki środowiskowej  $K_{2,f}$ . Jej wartość powinna być mniejsza niż 4 dB ( $K_{2,f} \leq 4$  dB; wartość taka sama jak podano przy określaniu poziomu mocy akustycznej źródła w zakresie częstotliwości poniżej 20 kHz w PN-EN ISO 9295 [15]). Oblicza się ją w dB, w tercjowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych  $f$  (8 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz, 40 kHz i 50 kHz) ze wzoru [10]:

$$K_{2,f} = 10 \log \left( 1 + 4 \frac{S}{A_f} \right) \approx \approx 10 \log \left( 1 + 156 \frac{r^2 T_f}{V} \right) \quad (4)$$

gdzie:

$S$  – pole powierzchni pomiarowej (dla półkuli powierzchni pomiarowej o promieniu  $r$ ,  $S = 2\pi r^2$ ), w  $m^2$

$A_f$  – chłonność akustyczna pomieszczenia, w  $m^2$ , w tercjowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , w  $m^2$

$V$  – objętość pomieszczenia badawczego, w  $m^3$   
 $T_f$  – czas pogłosu pomieszczenia badawczego, w tercjowym pasmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , w sekundach.

Uwaga! W badaniach uwzględniono półkulistą powierzchnię pomiarową o promieniu  $r = 1$  m.

Izolacyjność akustyczną ciśnieniową obudowy  $D_{p,f}$ , w dB, w tercjowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych  $f$  (8 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz, 40 kHz i 50 kHz), oblicza się ze wzoru [10]:

$$D_{p,f} = L'_{p,bez\_obudowie,f} - L'_{p,w\_obudowie,f} + K_{1,w\_obudowie,f} \quad (5)$$

gdzie:

$L'_{p,bez\_obudowie,f}$ ,  $L'_{p,w\_obudowie,f}$  – poziomy ciśnienia akustycznego w punkcie referencyjnym od źródła dźwięku, w tercjowym pasmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , zmierzone odpowiednio bez obudowy i w obudowie, w dB

$K_{1,w\_obudowie,f}$  – poprawka uwzględniająca wpływ hałasu tła podczas pomiarów źródła dźwięku, w obudowie (w tercjowym pasmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ ), w dB.

Poprawkę określa się z zależności [10]:

$$K_{1,w\_obudowie,f} = 0 \text{ dla } L'_{p,f} - L''_{p,f} > 15 \text{ dB}$$

$$K_{1,w\_obudowie,f} = -10 \log(1 - 10^{-0,1(L'_{p,f} - L''_{p,f})}) \text{ dla } 3 \text{ dB} \leq L'_{p,f} - L''_{p,f} \leq 15 \text{ dB}$$

$$K_{1,w\_obudowie,f} = ? \text{ dla } L'_{p,f} - L''_{p,f} < 3 \text{ dB} \quad (6)$$

gdzie:

$L'_{p,f}$  – poziom ciśnienia akustycznego, w tercjowym pasmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , w punkcie referencyjnym, gdy źródło emituje dźwięk, w dB

$L''_{p,f}$  – poziom ciśnienia akustycznego w tercjowym pasmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , w punkcie referencyjnym, gdy źródło nie emituje dźwięku, w dB

? – wartości poprawki nie da się określić wystarczająco dokładnie, a zatem nie można uwzględnić wpływu tła akustycznego.

Kwalifikację pomieszczenia badawczego pod względem możliwości uzyskania w nim wiarygodnych wyników pomiarów wykonuje się na podstawie obliczonej poprawki środowiskowej  $K_{3,f}$ . Jej wartość powinna być mniejsza niż 2 dB ( $K_{3,f} \leq 2$  dB; wartość taka sama jak podano przy określaniu poziomu ciśnienia akustycznego emisji w zakresie częstotliwości poniżej 10 kHz w PN-EN ISO 11201 [16]). Oblicza się ją w dB, w tercjowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych  $f$  (8 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz, 40 kHz i 50 kHz) ze wzoru [10]:

$$K_{3,f} = 10 \log\left(1 + 4 \frac{S}{A_f}\right) \approx \approx 10 \log\left(1 + 156 \frac{d^2 T_f}{V}\right) \quad (7)$$

gdzie:

$d$  – odległość między punktem referencyjnym (np. stanowiskiem pracy) a źródłem dźwięku, w metrach

$S = 2\pi d^2$ , w  $m^2$

$A_f$  – chłonność akustyczna pomieszczenia, w  $m^2$ , w tercjowym pasmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , w  $m^2$

$V$  – objętość pomieszczenia badawczego, w  $m^3$   
 $T_f$  – czas pogłosu pomieszczenia, w tercjowym pasmie częstotliwości o częstotliwości środkowej  $f$ , w sekundach.

Metody pomiaru tych wielkości podano w [10, 12, 13].

### Środowisko pomiarowe i aparatura pomiarowa

Badania przeprowadzono w pustym pomieszczeniu badawczym o objętości 300  $m^3$  (ściany i sufit były pokryte klinami dźwiękochłonnymi, podłoga z wykładziną dźwiękochłonną, a bezpośredni obszar, w którym wykonywano badania, miał podłogę odbijającą), w którym czas pogłosu w zakresie częstotliwości 8-50 kHz nie przekraczał 0,1 s. Jako źródło dźwięku (tor nadawczy) zastosowano generator dźwięku (generujący szum w zakresie częstotliwości 8-50 kHz) z multianalizatorem, ze wzmacniaczem mocy, z kolumną dźwiękową w kształcie piramidy (wykonaną w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym), zawierającą cztery głośniki. Jako miernik/analizator poziomu ciśnienia akustycznego (tor odbiorczy) zastosowano: mikrofon ćwierćcalowy z przedwzmacniaczem, moduł we/wy i system analizujący. Aparaturę pokazano na zdjęciu (fot. 1.). Punkty pomiarowe (w liczbie 17) umieszczono

na półkulistej powierzchni pomiarowej co 30° (rysunek w publikacji [13]).

### Kształt i materiały badanych obudów dźwiękoizolacyjnych

Obudowy dźwiękoizolacyjne miały konstrukcję szkieletową i kształt sześcianów o boku 500 mm (fot. 2.). Ich ścianki wykonano z:

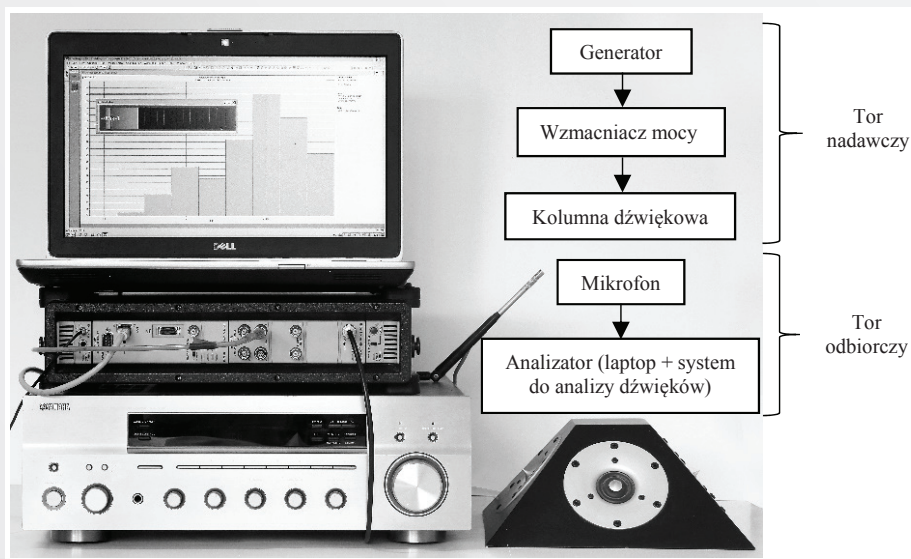
- drewnianych sklejek o trzech grubościach: 6, 12 i 18 mm (oznaczone W6, W12 i W18)
- blachy stalowej o grubości 2 mm (oznaczona S2)
- blach aluminiowych o grubości 2 i 4 mm (oznaczone AL2 i AL4)
- poliwęglanu o grubości 5 mm (oznaczona C5)
- pleksi o grubości 5 mm (oznaczona P5)
- kompozytu o grubości 4 mm: aluminium 0,3 mm + wypełniacz polimerowy 3,2 mm + aluminium 0,3 mm (oznaczona K4).

W pierwszej i drugiej części badań analizowano kolejno wpływ materiału, z którego wykonane są ścianki obudów, oraz wpływ grubości tych ścianek na izolacyjność akustyczną mocową obudów. W trzeciej części badań na ściankach wewnątrz obudowy zamontowano materiał dźwiękochłonny w postaci pianki gumowej o grubości 15 mm (oznaczona PI15) i 20 mm (oznaczona PI20). W czwartej części badań uwzględniono pojedynczy otwór – o średnicy 10, 50 i 100 mm – pośrodku jednej ścianki bocznej.

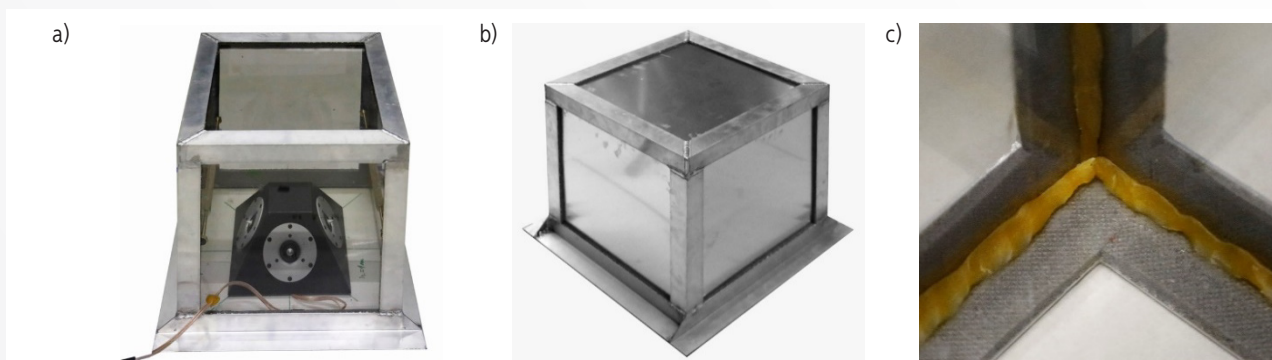
### Wyniki badań

Wpływ materiału ścianek obudowy na jej izolacyjność akustyczną mocową

Na rys. 1. pokazano wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej mocowej obudów szkieletowych wykonanych: ze sklejki o grubości 6 i 18 mm (W6 i W18), z blachy stalowej o grubości 2 mm (S2), blachy aluminiowej o grubościach 2 i 4 mm (AL2 i AL4), poliwęglanu o grubości 5 mm (C5), pleksi o grubości 5 mm (P5) oraz kompozytu o grubości 4 mm (K4).



Fot. 1. Aparatura pomiarowa zastosowana w badaniach izolacyjności akustycznej obudów. Zdjęcie z archiwum autora  
 Photo 1. Measuring equipment used in the tests of sound insulation of enclosures. Photo from the author's archive



Fot. 2. Widok obudowy ze ściankami z poliwęglanu (a) i aluminium (b) oraz fragment łączenia ścianek ze szkieletem (c). Wewnątrz obudowy znajduje się kolumna dźwiękowa (między ściankami obudowy a szkieletem obudowy oraz między szkieletem obudowy a podłożem umieszczono piankę – jako wibroizolację). Otwór w ścianie obudowy, przez który przychodzi przewód zasilający, oraz szczeliny między ściankami uszczelniono materiałem plastycznym, stosowanym w formowanych ochronnikach słuchu (wkładkach przeciwhałasowych). Zdjęcia z archiwum autora

Photo 2. View of the enclosure with polycarbonate (a) and aluminum (b) walls and a fragment of the connection between the walls and the skeleton (c). Inside the enclosure there is a sound column (foam is placed between the enclosure walls and the enclosure skeleton and between the enclosure skeleton and the ground surface – as a vibration isolation). The hole in the housing wall through which the power cord enters and the gaps between the walls are sealed with a plastic material used in molded hearing protectors (earplugs). Photos from the author's archive

Trudno jest porównywać właściwości dźwiękoizolacyjne obudów wykonanych z różnych materiałów, ponieważ na wartość izolacyjności akustycznej wpływa też grubość ścianek obudów (co dalej zostało szczegółowo wyjaśnione). Można jednak stwierdzić, że obudowa z kompozytu o grubości 4 mm (K4) ma najniższe właściwości dźwiękoizolacyjne – średnia wartość izolacyjności akustycznej mocowej w zakresie częstotliwości 10-40 kHz (tj. średnia arytmetyczna z wartości izolacyjności akustycznych w tercjowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz i 40 kHz) wynosi 29,6 dB. Również stosunkowo słabe właściwości mają pod tym względem obudowy ze ściankami przezroczystymi z pleksi (P5) i poliwęglanu (C5) – średnie wartości izolacyjności akustycznej mocowej w zakresie częstotliwości 10-40 kHz wynoszą odpowiednio 30,7 dB i 34,6 dB. Wprawdzie można poprawić izolacyjność tych obudów przez zwiększenie grubości ścianek powyżej 5 mm, lecz traci się wtedy zaletę pleksi i poliwęglanu, tj. przezroczystość. Z tego samego powodu nie można zastosować materiałów dźwiękochłonnych wewnątrz tych obudów. Dlatego w obudowach dźwiękoizolacyjnych poliwęglan i pleksi stosuje się tylko w oknach kontrolnych o powierzchni ograniczonej do minimum.

Obudowa ze ściankami z blachy stalowej o grubości 2 mm ma większą izolacyjność akustyczną mocową (średnia w zakresie częstotliwości 10-40 kHz wynosi 36 dB) niż obudowa ze ściankami z blachy aluminiowej o takiej samej grubości (średnia w zakresie częstotliwości 10-40 kHz wynosi 32,4 dB), ale mniejszą niż z blachy aluminiowej o grubości 4 mm (średnia w zakresie częstotliwości 10-40 kHz wynosi 39,2 dB). Można oszacować, że izolacyjność akustyczna obudowy z blachy stalowej o zadanej grubości jest taka sama jak obudowy z blachy aluminiowej o grubości półtora razy większej. Gdyby jako kryterium stosować masę obudowy, to można stwierdzić, że obudowa z blachy aluminiowej, mimo że ma grubsze ścianki, będzie znacznie

lejsza niż obudowa z blachy stalowej (obie o tej samej izolacyjności akustycznej).

Zwiększenie izolacyjności akustycznej mocowej obudowy przy podwojeniu częstotliwości (w zakresie częstotliwości 10-40 kHz) wynosi:

- w przypadku sklejki i kompozytu: 9,6-10,3 dB
- w przypadku poliwęglanu, pleksi, blach aluminiowej i stalowej: 12,1-12,8 dB.

#### Wpływ grubości ścianek obudowy na jej izolacyjność akustyczną mocową

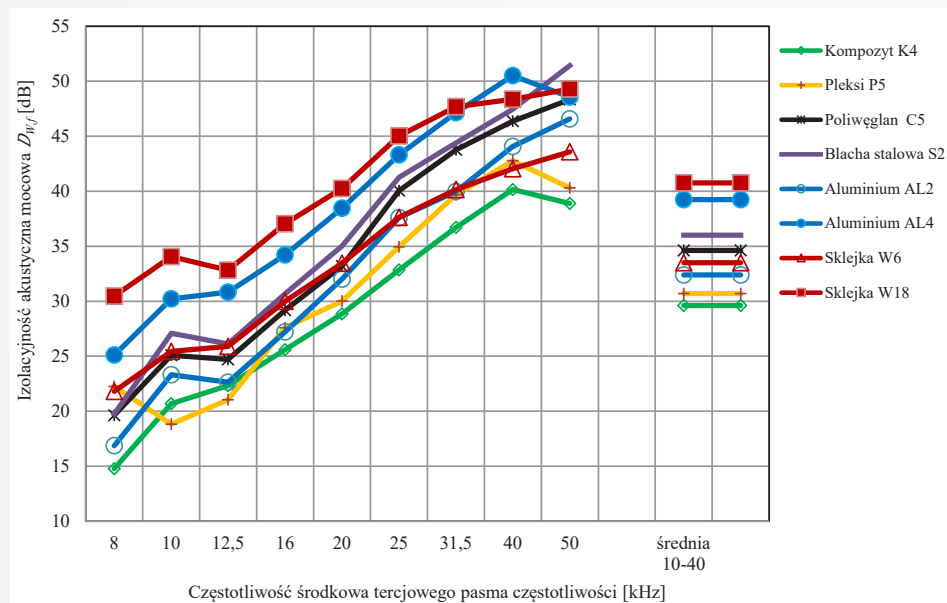
Na rys. 2. przedstawiono wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej mocowej obudowy szkieletowej z aluminium o dwóch grubościach ścianek oraz ze sklejki o trzech grubościach ścianek.

Przy wzroście grubości ścianek (a więc i wzroście masy) obudowy wykonanej z danego materiału rośnie jej izolacyjność akustyczna. Dwukrotny wzrost grubości ścianek powoduje, w zakresie częstotliwości 10-40 kHz, wzrost średniej izolacyjności akustycznej mocowej obudowy o:

- 6,8 dB w przypadku blachy aluminiowej
- 4,9 dB w przypadku sklejki.

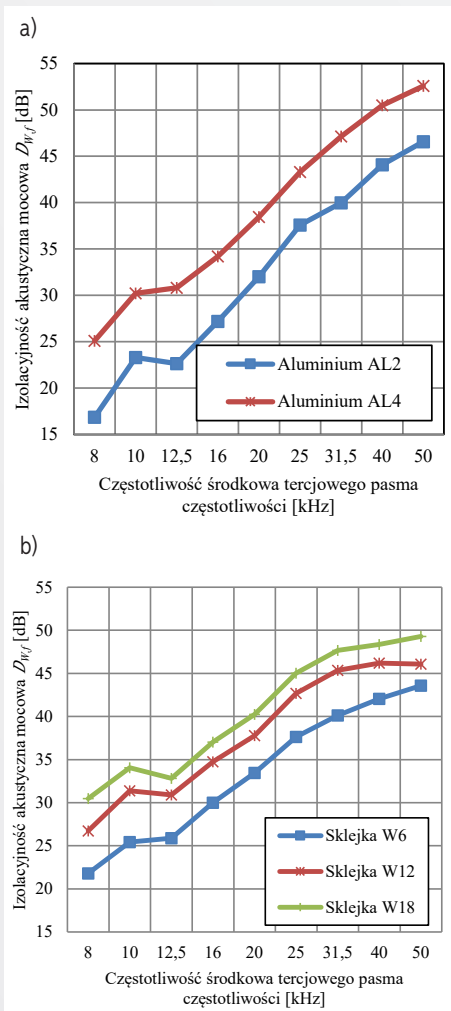
#### Wpływ wyściółki obudowy na jej izolacyjność akustyczną mocową

W artykule wyściółką określa się materiał, którym wyłożone jest wnętrze obudowy (tj. cztery ściany boczne i ściana górna).



Rys. 1. Izolacyjność akustyczna mocowa obudów szkieletowych ze ściankami z różnych materiałów: kompozytu o grubości 4 mm (K4), pleksi o grubości 5 mm (P5), poliwęglanu o grubości 5 mm (C5), blachy stalowej o grubości 2 mm (S2), blachy aluminiowej o grubościach 2 i 4 mm (AL2 i AL4) oraz sklejki o grubości 6 i 18 mm (W6 i W18). Część danych w zakresie częstotliwości 10-40 kHz dla tych materiałów opublikowano w [13]), a dla sklejki W6 – także w [12]

Fig. 1. Sound power insulation of skeleton enclosure with walls made of various materials: composite 4 mm thick (K4), plexiglass 5 mm thick (P5), polycarbonate 5 mm thick (C5), steel sheet 2 mm thick (S2), aluminum sheet with a thickness of 2 and 4 mm (AL2 and AL4) and plywood with a thickness of 6 and 18 mm (W6 and W18). Part of the data in the frequency range 10-40 kHz for these materials was published in [13]), and for W6 plywood – also in [12]



Rys. 2. Izolacyjność akustyczna mocowa obudów szkieletowych o różnych grubościach ścianek: a) z aluminium, b) ze sklejki. Część danych w zakresie częstotliwości 10-40 kHz dla tych materiałów opublikowano w [13]), a dla sklejki W6 i W12 – także w [12]

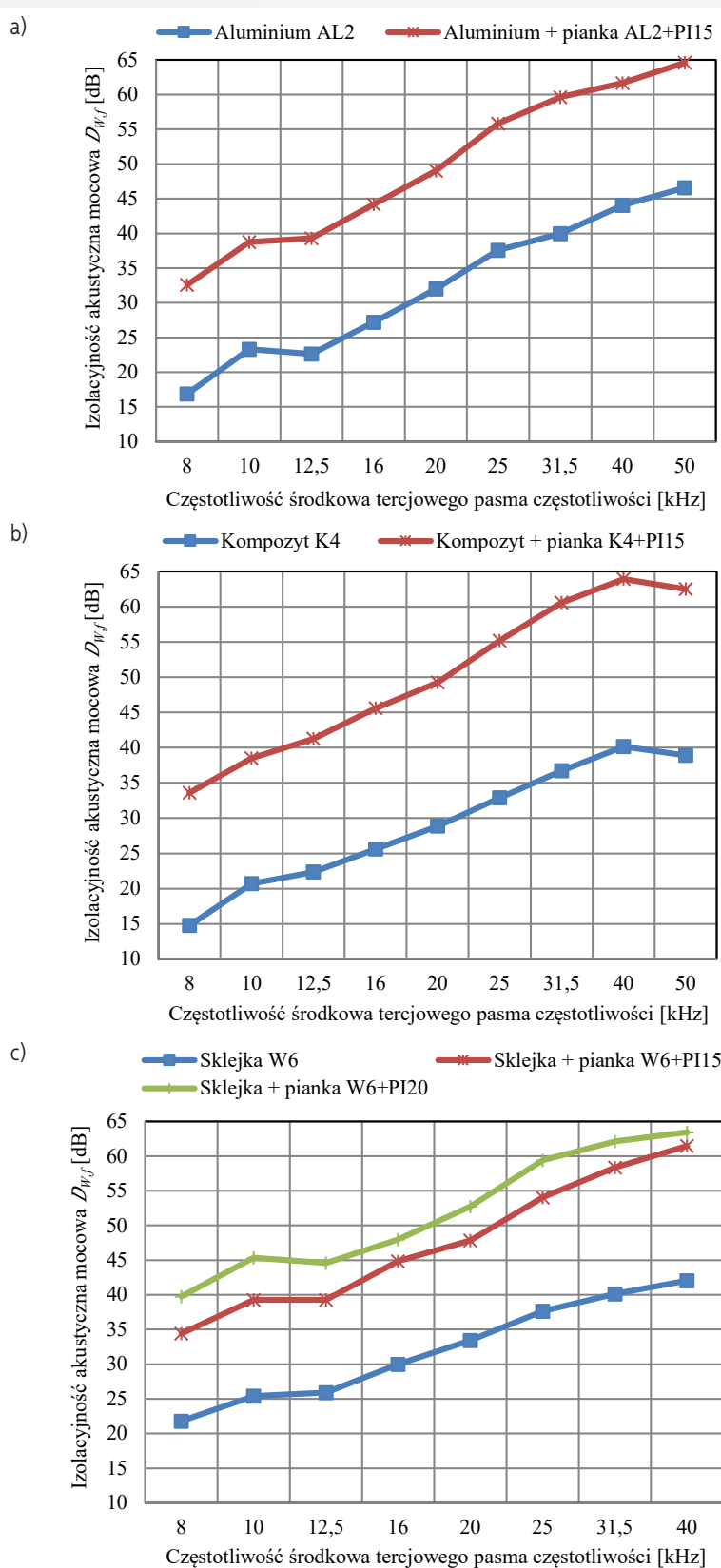
Fig. 2. Sound power insulation of skeleton enclosure with different wall thicknesses: a) made of aluminium, b) made of plywood. Part of the data in the frequency range 10-40 kHz for these materials was published in [13]), and for W6 and W12 plywood – also in [12]

Na rys. 3. zaprezentowano wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej mocowej obudowy szkieletowej z wyściółką z pianki i bez wyściółki, o ściankach wykonanych z aluminium (grubość pianki 15 mm), kompozytu (grubość pianki 15 mm) oraz ze sklejki (grubości pianki: 15 i 20 mm).

Zastosowanie materiału dźwiękochłonnego w obudowie wyraźnie zwiększa jej izolacyjność akustyczną mocową. W zakresie częstotliwości 10-40 kHz wzrost średniej izolacyjności akustycznej mocowej obudowy, uzyskany po zastosowaniu pianki 15 mm, wyniósł:

- 21,0 dB – w przypadku ścianek z kompozytu K4 i K4+PI15
- 17,4 dB – w przypadku ścianek z aluminium AL2 i AL2+PI15
- 14,8 dB (19,7dB) – w przypadku ścianek ze sklejki W6 i W6+PI15 (W6 i W6+PI20).

Zwiększenie grubości pianki z 15 do 20 mm (tj. o 1/3 grubości/masy – w odniesieniu do ścianki ze sklejki) powoduje, w zakresie częstotliwości



Rys. 3. Wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej mocowej obudów szkieletowych ze ściankami z aluminium (o grubości 2 mm), kompozytu (o grubości 4 mm) oraz ze sklejki (o grubości 6 mm), z wyściółką z pianki (PI15 o grubości 15 mm i PI20 o grubości 20 mm) oraz bez wyściółki. Część danych w zakresie częstotliwości 10-40 kHz dla tych materiałów opublikowano w [13]), a dla sklejki W6 bez pianki i z pianką PI20 – także w [12]

Fig. 3. Results of measurements of the sound power insulation of skeleton enclosure with walls made of aluminium (2 mm thick), composite (4 mm thick) and plywood (6 mm thick), with foam padding (15 mm thick PI15 and PI20 20 mm thick) and without lining. Part of the data in the frequency range 10-40 kHz for these materials was published in [13]), and for W6 plywood without foam and with PI20 foam – also in [12]

10-40 kHz, średnie zwiększenie izolacyjności akustycznej z 14,8 dB do 19,7 dB (tj. również o ok. 1/3).

#### Wpływ otworu w ścianie obudowy na jej izolacyjność akustyczną mocową

Na rys. 4. pokazano wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej mocowej obudowy szkieletowej, której ścianki wykonano ze sklejki o grubości 12 mm, przy czym w jednej ze ścianek bocznych znajdował się otwór o średnicy 10 mm, 50 mm lub 100 mm.

Średnia izolacyjność akustyczna mocowa obudowy o pełnych ściankach ze sklejki 12 mm, w zakresie częstotliwości 10-40 kHz, wynosi 38,4 dB. Po uwzględnieniu otworu w jednej ze ścianek bocznych obudowy jej średnia izolacyjność akustyczna mocowa spada do wartości:

- 27,4 dB (zmniejszenie izolacyjności akustycznej, tj. różnica między izolacyjnością akustyczną obudowy bez otworu i obudowy z otworem) o  $\Delta D_{w,10-40kHz} = 11$  dB – w przypadku otworu o średnicy 10 mm
- 15,1 dB (zmniejszenie o  $\Delta D_{w,10-40kHz} = 23,3$  dB) – w przypadku otworu o średnicy 50 mm
- 9,6 dB (zmniejszenie o  $\Delta D_{w,10-40kHz} = 28,8$  dB) – w przypadku otworu o średnicy 100 mm.

Wynika z tego, że szczelność obudowy ma bardzo duże znaczenie z punktu widzenia jej skuteczności w ograniczaniu hałasu ultradźwiękowego w środowisku, w tym hałasu na stanowiskach pracy.

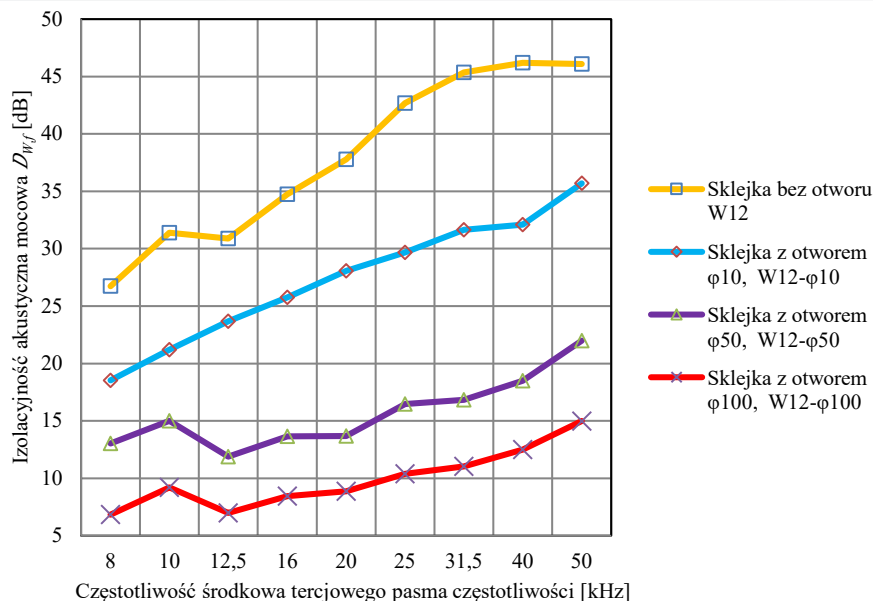
Na rys. 5., na wykresach kołowych stosowanych do określania kierunkowości emisji dźwięku ze źródeł, podano (w odniesieniu do przykładowych trzech częstotliwości) na płaszczyźnie poziomej, w odległości 1 m od środka obudowy z otworami, wartości izolacyjności akustycznej ciśnieniowej w punktach wokół obudowy (tj. kąto-

w zakresie kątów  $\alpha$  0-360°). Oś otworu jest na osi oznaczonej „0” stopni. Z rysunku wynika, że izolacyjność akustyczna ciśnieniowa zależy od częstotliwości, średnicy otworu i położenia punktu odniesienia, w którym się ją określa. Generalnie najmniejsza izolacyjność akustyczna ciśnieniowa występuje na osi otworu ( $\alpha = 0^\circ$ ), a największa w punkcie przeciwnym do ściany z otworem ( $\alpha = 180^\circ$ ). Przykładowo izolacyjności akustyczne ciśnieniowe dla 20 kHz na osi otworu ( $\alpha = 0^\circ$ ) wynoszą: w przypadku otworu  $\phi 100$  mm – 6,2 dB,  $\phi 50$  mm – 12 dB,  $\phi 10$  mm – 24,9 dB, a w przypadku braku otworu – 37,9 dB.

Wyraźnie też widać, że w obszarze, z którego widoczny jest otwór (zakresy kąta  $\alpha$  na rys. 5.: 0-90° i 270-360°), izolacyjność akustyczna ciśnieniowa jest znacznie mniejsza niż w obszarze, z którego otwór nie jest widoczny (tam wartości izolacyjności akustycznej ciśnieniowej i mocowej są zbliżone). Wynika z tego praktyczna przesłanka: aby uzyskać dużą efektywność akustyczną obudowy z otworem, otwór powinien się znajdować w ścianie przeciwległej lub co najwyżej bocznej obudowy względem stanowiska pracy.

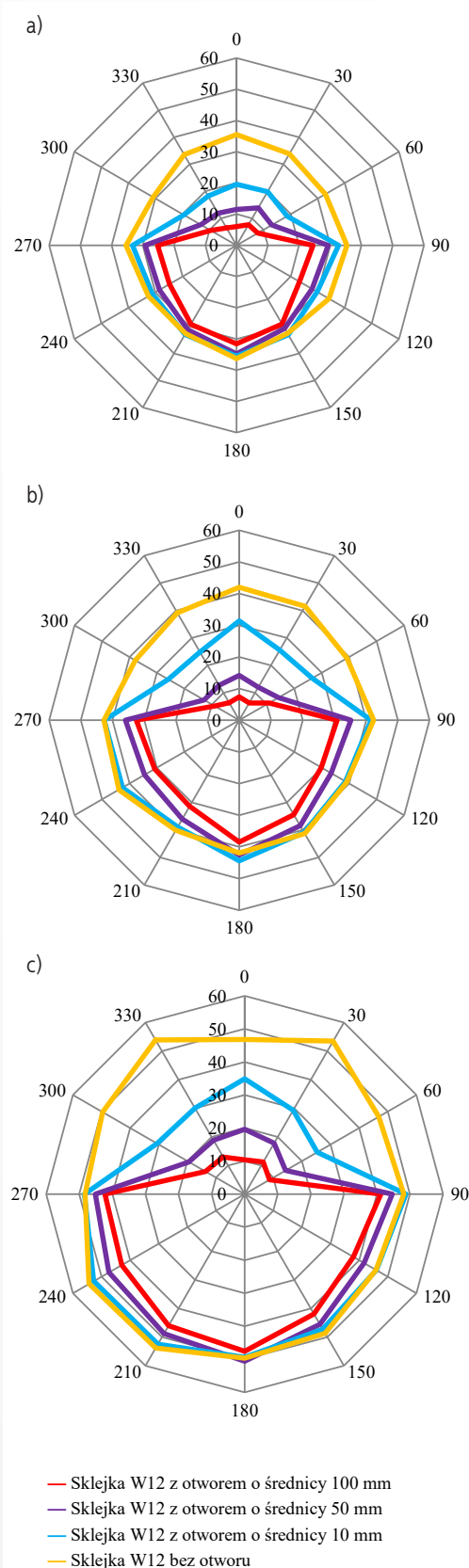
#### Podsumowanie

W artykule przytoczono wyniki badań izolacyjności akustycznej obudów dźwiękochłono-izolacyjnych, stosowanych do urządzeń ultradźwiękowych. Analizowano wpływ różnych materiałów, z którego wykonane są ścianki obudów (sklejki drewnianej, blachy aluminiowej i stalowej, pleksi, poliwęglanu oraz kompozytu aluminiowo-polimerowo-aluminiowego), a także grubości ścianek oraz obecność wyściółki i nieuszczelnienia (otworu) w obudowie na jej izolacyjność akustyczną.



Rys. 4. Wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej mocowej obudowy szkieletowej ze sklejki o grubości 12 mm, z uwzględnieniem otworu (o średnicy 10 mm, 50 mm lub 100 mm) usytuowanego w jednej ścianie bocznej. Część danych w zakresie częstotliwości 10-40 kHz dla W12 opublikowano w [12] i [13]

Fig. 4. Measurement results of the sound power insulation of the 12 mm thick plywood skeleton enclosure, taking into account the hole (with a diameter of 10 mm, 50 mm or 100 mm) located in one side wall. Part of the data in the 10-40 kHz frequency range for W12 was published in [12] and [13]



Rys. 5. Izolacyjność akustyczna ciśnieniowa  $D_{p,p}$  w dB, wokół obudowy (w płaszczyźnie poziomej) w odległości 1 m od jej środka, dla częstotliwości: a) 10 kHz, b) 20 kHz i c) 40 kHz

Fig. 5. Sound pressure insulation  $D_{p,p}$  in dB, around the skeleton enclosure (in the horizontal plane) at a distance of 1 m from its center, for the frequency: a) 10 kHz, b) 20 kHz and c) 40 kHz

Największe wartości izolacyjności akustycznej wszystkich badanych obudów wyniosły: ok. 45 dB – w przypadku pasma tercjowego o częstotliwości środkowej 10 kHz, ok. 65 dB – w przypadku częstotliwości 40 kHz. Średnie wartości izolacyjności akustycznej mocowej obudów bez materiału dźwiękochłonnego we wnętrzu, w zakresie tercjowych pasm częstotliwości od 10 kHz do 40 kHz, wyniosły od 30 dB do 41 dB. Dwukrotne zwiększenie grubości (a więc i masy) ścianek obudów spowodowało wzrost izolacyjności akustycznej o ok. 5-7 dB. Zastosowanie pianki gumowej o grubości 15 mm jako wyściółki obudów zwiększyło izolacyjność akustyczną o ok. 17-21 dB. Zwiększenie grubości pianki o 1/3 spowodowało przyrost wartości izolacyjności akustycznej obudowy również o ok. 1/3.

Nieszczelności w obudowie wpłynęły na znaczne zmniejszenie jej skuteczności. Mały otwór o średnicy 10 mm na jednej ze ścianek zmniejszył izolacyjność akustyczną mocową obudowy o 11 dB, a duży otwór o średnicy 100 mm (np. otwór z wentylatorem) spowodował bardzo duży spadek izolacyjności – do ok. 10 dB. Efektywność obudowy z otworem lub nieszczelnościami, oceniana poziomem obniżenia hałasu w jej sąsiedztwie, będzie zależała od położenia ścianki z otworem względem stanowiska pracy i będzie największa w przypadku usytuowania otworu w tylnej ścianie (izolacyjność akustyczna ciśnieniowa będzie zbliżona do izolacyjności akustycznej obudowy z tylną ścianką bez otworu). Jeżeli natomiast otwór będzie widoczny ze stanowiska pracy, wtedy izolacyjność akustyczna ciśnieniowa obudowy w zakresie częstotliwości 10-40 kHz zmniejszy się z 31-46 dB do 5-8 dB.

Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że obudowy dźwiękoizolacyjne są skutecznym środkiem technicznym, pozwalającym na obniżenie poziomu hałasu emitowanego przez maszyny i urządzenia do środowiska w zakresie pasm tercjowych o częstotliwościach środkowych od 8 kHz do 50 kHz. Izolacyjność akustyczna obudowy zależy od rodzaju materiału, z którego wykonane są jej ścianki, od grubości (masy) tych ścianek, od materiału dźwiękochłonnego zastosowanego wewnątrz obudowy oraz od jej szczelności. Ponieważ wpływ tych wszystkich elementów jest uwarunkowany częstotliwością, dlatego skuteczność akustyczna obudowy będzie zależała od źródła hałasu (jego widma częstotliwościowego i kierunkowości emisji dźwięku) oraz lokalizacji stanowiska pracy.

Największe znaczenie pod względem możliwości obniżenia poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości 8-50 kHz w środowisku ma szczelność obudowy – nieszczelności mogą zmniejszyć izolacyjność akustyczną obudowy nawet o 30 dB. Na drugim miejscu znajduje się rodzaj materiału dźwiękochłonnego zastosowanego wewnątrz obudowy – umożliwia on zwiększenie izolacyjności akustycznej obudowy nawet o 25 dB. Nieco mniejszą rolę odgrywa rodzaj

materiału, z którego wykonano ścianki obudowy (wpływ różnych materiałów na izolacyjność akustyczną mocową zawiera się w zakresie do 20 dB). Najmniejszy wpływ na skuteczność obudowy ma grubość ścianek obudowy (każde podwojenie grubości ścianek zwiększa izolacyjność akustyczną obudowy o 5-6 dB). Powyższe wnioski stanowią ważne wskazówki do projektowania obudów przeznaczonych do urządzeń będących źródłem hałasu ultradźwiękowego.

## BIBLIOGRAFIA

[1] ASTM E1704-95(2018). Standard Guide for Specifying Acoustical Performance of Sound-Isolating Enclosures. <https://www.astm.org/Standards/E1704.htm> (dostęp 20.04.2021).

[2] PN-EN ISO 15667:2004. Akustyka – Wytyczne dotyczące ograniczania hałasu przez obudowy i kabiny.

[3] ENGEL, Z., SIKORA J. Obudowy dźwiękochłonne-izolacyjne. Podstawy projektowania i stosowania. Kraków: Wydawnictwo AGH, 1998.

[4] PN-EN ISO 11546-2:2010. Akustyka – Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości obudów – Część 2: Pomiary w warunkach terenowych (dla celów akceptacji i weryfikacji).

[5] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. poz. 1286 z późn. zm.) – załącznik nr 2 pkt A.

[6] MIKULSKI, W., PLEBAN, D. Hałas, hałas infradźwiękowy i hałas ultradźwiękowy. W: POŚNIAK, M., SKOWROŃ, J., red. Czynniki szkodliwe w środowisku pracy. Wartości dopuszczalne 2020 (wyd. XII). Warszawa: CIOP-PIB, 2020.

[7] ŚLIWIŃSKI, A. Assessment of ultrasonic noise hazard in work places environment. Archives of Acoustics. 2013, 38(2): 243-252, doi: 10.2478/aoa-2013-0029.

[8] ŚLIWIŃSKI, A. On the noise hazard assessment within the intermediate range of the high audible and the low ultrasonic frequencies. Archives of Acoustics. 2016, 41(2): 331-338, doi: 10.1515/aoa-2016-0034.

[9] DOBRUCKI, A., et al. Sound-absorbing and insulating enclosures for ultrasonic noise. Archives of Acoustics. 2010, 35(2): 157-164. 2010, doi: 10.2478/v10168-010-0014-4.

[10] MIKULSKI, W. Izolacyjność akustyczna obudów w zakresie częstotliwości 8-50 kHz. Materiały z konferencji XLVII Szkoły Zimowej Akustyki Środowiska i Wibroakustyki, 25 lutego – 1 marca 2019 r. Gliwice-Szczyrk. Oddział Górnośląski Polskiego Towarzystwa Akustycznego oraz Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk, ISBN:978-83-931744-9-2, s. 19-30, [https://www.researchgate.net/publication/337362951\\_Materiały\\_XLVII\\_Szkoły\\_Zimowej\\_Akustyki\\_Srodowiska\\_i\\_Wibroakustyki](https://www.researchgate.net/publication/337362951_Materiały_XLVII_Szkoły_Zimowej_Akustyki_Srodowiska_i_Wibroakustyki).

[11] PLEBAN, D., MIKULSKI, W. Methods of testing of sound insulation properties of barriers intended for high frequency noise and ultrasonic noise protection. Journal of Mechanical Engineering – Strojnícky časopis. 2018, 68(4): 55-64, doi: 10.2478/scjme-2018-0047.

[12] MIKULSKI, W. Studies on Sound Insulation of Enclosures in the 10-40 kHz Frequency Range. W: PLEBAN, D., ed. Occupational noise and workplace acoustics. Advances in Measurement and Assessment techniques. Boca Raton, London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2021, pp. 253-274, doi: 10.1201/9781003048121.

[13] MIKULSKI, W. Reducing the harmful effects of noise on the human environment. Sound insulation in the 10-40 kHz frequency range of a skeleton enclosure on a noise source. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2020, 18: 1451-1463, doi: 10.1007/s40201-020-00560-2.

[14] PN-EN ISO 3744:2011. Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metody techniczne stosowane w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk.

[15] PN-EN ISO 9295:2015. Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy hałasu wysokiej częstotliwości emitowanego przez maszyny i urządzenia.

[16] PN-EN ISO 11201:2012. Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Wyznaczanie poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk z pomijalnymi poprawkami środowiskowymi.

[17] MIKULSKI, W. Method of Determining the Sound Absorbing Coefficient of Materials within the Frequency Range of 5000-50 000 Hz in a Test Chamber of a Volume of about 2 m<sup>3</sup>. Archives of Acoustics. 2013, 38(2): 177-183, doi: 10.2478/aoa-2013-0020.

[18] PLEBAN, D. Method of testing of sound absorption properties of materials intended for ultrasonic noise protection. Archives of Acoustics. 2013, 38(2): 191-195, doi: 10.2478/aoa-2013-0022.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej.*

*Koordinator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

*Autor dziękuje kolegom z Zakładu Zagrożeń Wibroakustycznych Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego, a zwłaszcza technikowi Jerzemu Kozłowskiemu, za pomoc w wykonaniu pomiarów.*