

dr hab. inż. KRZYSZTOF KOSAŁA (ORCID: 0000-0002-8463-6959)

dr inż. RYSZARD OLSZEWSKI (ORCID: 0000-0002-4127-1718)

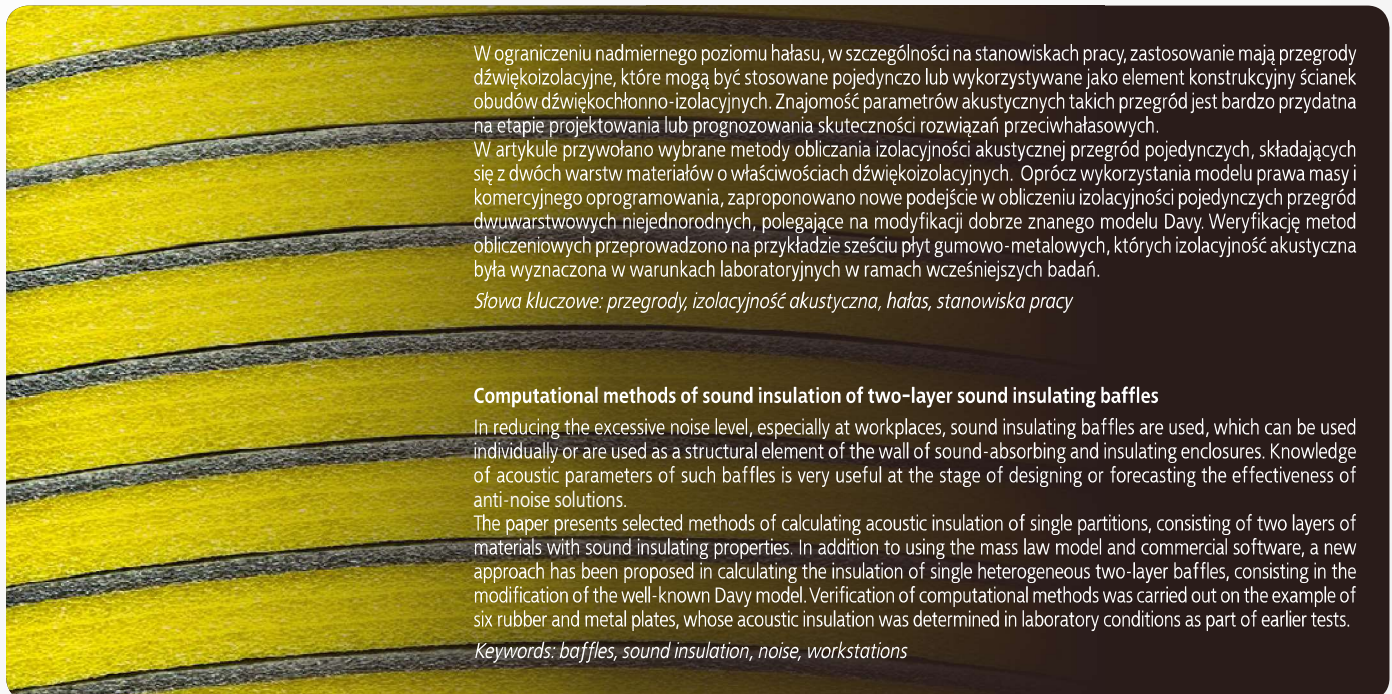
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki

Kontakt: kosala@agh.edu.pl

DOI: 10.5604/01.3001.0013.5316

# Metody obliczeniowe wyznaczania izolacyjności akustycznej dwuwarstwowych przegród dźwiękoizolacyjnych

Fot. Valermaxx/Bigstockphoto



W ograniczeniu nadmiernego poziomu hałasu, w szczególności na stanowiskach pracy, zastosowanie mają przegrody dźwiękoizolacyjne, które mogą być stosowane pojedynczo lub wykorzystywane jako element konstrukcyjny ścianek obudów dźwiękochłonna-izolacyjnych. Znajomość parametrów akustycznych takich przegród jest bardzo przydatna na etapie projektowania lub prognozowania skuteczności rozwiązań przeciwhałasowych.

W artykule przywołano wybrane metody obliczania izolacyjności akustycznej przegród pojedynczych, składających się z dwóch warstw materiałów o właściwościach dźwiękoizolacyjnych. Oprócz wykorzystania modelu prawa masy i komercyjnego oprogramowania, zaproponowano nowe podejście w obliczeniu izolacyjności pojedynczych przegród dwuwarstwowych niejednorodnych, polegające na modyfikacji dobrze znanego modelu Davy. Weryfikację metod obliczeniowych przeprowadzono na przykładzie sześciu płyt gumowo-metalowych, których izolacyjność akustyczna była wyznaczona w warunkach laboratoryjnych w ramach wcześniejszych badań.

*Słowa kluczowe:* przegrody, izolacyjność akustyczna, hałas, stanowiska pracy

## Computational methods of sound insulation of two-layer sound insulating baffles

In reducing the excessive noise level, especially at workplaces, sound insulating baffles are used, which can be used individually or are used as a structural element of the wall of sound-absorbing and insulating enclosures. Knowledge of acoustic parameters of such baffles is very useful at the stage of designing or forecasting the effectiveness of anti-noise solutions.

The paper presents selected methods of calculating acoustic insulation of single partitions, consisting of two layers of materials with sound insulating properties. In addition to using the mass law model and commercial software, a new approach has been proposed in calculating the insulation of single heterogeneous two-layer baffles, consisting in the modification of the well-known Davy model. Verification of computational methods was carried out on the example of six rubber and metal plates, whose acoustic insulation was determined in laboratory conditions as part of earlier tests.

*Keywords:* baffles, sound insulation, noise, workstations

## Wstęp

Hałas jest jednym z najczęściej występujących zagrożeń w środowisku pracy, którego konsekwencje w postaci znaczącego ubytku słuchu dotyczą osób na niego narażonych [1]. Narażenie na hałas stanowi poważny problem, zwłaszcza gdy dotyczy stanowisk pracy, na których maszyny i urządzenia wymagają ciągłej i bezpośredniej obsługi przez operatorów. W ograniczaniu hałasu bardzo szerokie zastosowanie mają przegrody dźwiękoizolacyjne, które mogą być stosowane bezpośrednio, na przykład w postaci osłon dźwiękoizolacyjnych [2,3], lub mogą stanowić element konstrukcyjny przy budowie innych rodzajów zabezpieczeń przeciwhałasowych na przykład obudów dźwiękochłonna-izolacyjnych [4,5].

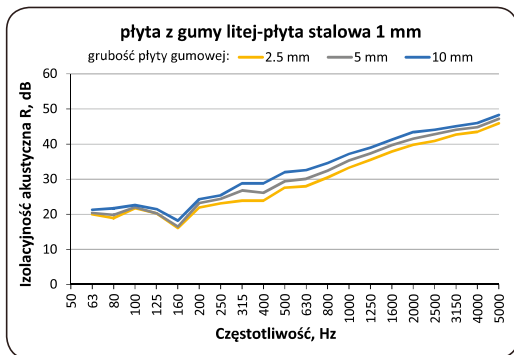
Istnieje szereg modeli obliczeniowych, które pozwalają oszacować skuteczność działania przegród wykorzystywanych do zmniejszenia narażenia operatorów na hałas na stanowisku pracy w zależ-

ności od przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego [12-14]. Ma to szczególne znaczenie w warunkach elastycznego kształtowania procesu produkcyjnego z zastosowaniem różnych technologii wytwarzania. Znajomość podstawowych modeli obliczeniowych i zakresu ich stosowalności w odniesieniu do przegród dźwiękoizolacyjnych daje możliwość doboru środków ochronnych oraz oszacowania ich skuteczności przez osoby zajmujące się ograniczaniem hałasu na stanowiskach pracy.

Ogólny podział przegród stosowanych w obudowach dźwiękochłonna-izolacyjnych obejmuje przegrody pojedyncze i wielokrotne [6]. Wśród przegród pojedynczych, różniących się od wielokrotnych tym, że pomiędzy warstwami przegrody nie występują szczeliny powietrzne, wyróżnia się przegrody jednorodne, czyli wykonane z jednolitego materiału oraz warstwowe niejednorodne, składające się z różnych, ściśle przylegających do siebie materiałów.

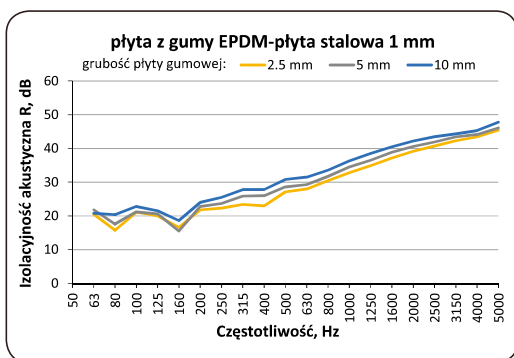
Przykładem dźwiękoizolacyjnych przegród warstwowych niejednorodnych są przegrody gumowo-metalowe, omawiane w artykule.

Właściwości akustyczne przegród gumowo-metalowych, w tym struktur złożonych z różnymi rodzajami płyt metalowych z różnymi rodzajami gum, w tym gumy porowatej, zostały omówione szerzej w publikacji Jana Sikory [6]. Zakres badań tam opisanych obejmował przede wszystkim eksperymenty przeprowadzone na dwóch stanowiskach laboratoryjnych Katedry Mechaniki i Wibroakustyki AGH. Jedno ze stanowisk, jakim jest zespół sprzężonych komór pogłosowych, służy do badań izolacyjności akustycznej przegród, mających zastosowanie w wibroakustyce przemysłowej. Drugie stanowisko, przeznaczone jest do badań własności akustycznych materiałów i ustrojów głównie własności dźwiękochłonnnych.



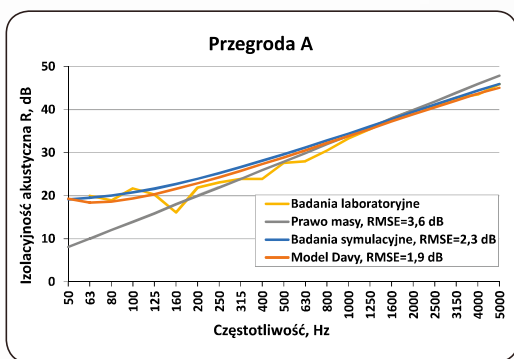
Rys. 1. Charakterystyki izolacyjności akustycznej  $R$  dla przegród dwuwarstwowych o składzie: płyta z gumy litej o gęstości  $1490 \text{ kg/m}^3$  i grubości 2,5; 5 i 10 mm oraz płyta stalowa o grubości 1 mm [16]

Fig. 1. Characteristics of sound insulation  $R$  for two-layer baffles with the following composition: solid rubber layer with a density of  $1490 \text{ kg/m}^3$  and a thickness of 2.5; 5 and 10 mm and a steel plate with a thickness of 1 mm [16]



Rys. 2. Charakterystyki izolacyjności akustycznej  $R$  dla przegród dwuwarstwowych o składzie: płyta z gumy EPDM 40 o gęstości  $1210 \text{ kg/m}^3$  i grubości 2,5; 5 i 10 mm oraz płyta stalowa o grubości 1 mm [16]

Fig. 2. Characteristics of sound insulation  $R$  for two-layer baffles with the following composition: solid rubber layer with a density of  $1210 \text{ kg/m}^3$  and a thickness of 2.5; 5 and 10 mm and a steel plate with a thickness of 1 mm [16]



Rys. 3. Charakterystyki izolacyjności akustycznej przegrody A, wyznaczone z badań symulacyjnych, modelu wykorzystującego prawo masy i modelu Davy oraz z badań laboratoryjnych

Fig. 3. Sound insulation characteristics for the A baffle, determined from simulation tests, mass law and Davy model, and from laboratory tests

Podstawową wielkością charakterystyczną przegród dźwiękoizolacyjnych jest izolacyjność akustyczna od dźwięków powietrznych, którą wyznacza się przede wszystkim w warunkach laboratoryjnych. Izolacyjność akustyczną wyznaczyć można także wykorzystując teoretyczne modele obliczeniowe. Zastosowanie tego drugiego podejścia nabiera znaczenia zwłaszcza w przypadku, gdy budowa prototypu przegrody lub docelowo obudowy, w celu sprawdzenia jej skuteczności akustycznej, jest zbyt kosztowna lub wręcz nieopłacalna.

Tabela 1. Dane materiałowe badanych przegród gumowo-metalowych

Table 1. Physical parameters of tested rubber and metal baffles

Oznaczenie przegrody	Rodzaj płyty	Grubość płyty, mm	Grubość przegrody, mm	Gęstość, $\rho$ , $\text{kg/m}^3$	Moduł Younga E, Gpa	Współczynnik Poissona, $\nu$	Współczynnik tłumienia, $\eta$
A	Guma lita	2,5	3,5	1490	0,003	0,001	0,3
B		5	6				
C		10	11				
D	Guma EPDM 40	2,5	3,5	1210	0,006	0,48	0,3
E		5	6				
F		10	11				
-	Stal	1	-	7850	207	0,3	0,01

Tabela 2. Częstotliwości koincydencji przegród gumowo-metalowych

Table 2. Frequencies of coincidences of rubber and metal baffles

Przegroda	A	B	C	D	E	F
$f_c$ , Hz	14690	16827	20007	14222	15928	17929

Wykorzystanie metod obliczeniowych do wyznaczania izolacyjności akustycznej przegród pojedynczych jednorodnych, z użyciem prawa masy [10-12] lub z użyciem modeli obliczeniowych, takich jak Sharp i Davy [12] oraz Statystyczna Analiza Energii [9], pokazano między innymi w publikacjach [7-9].

W artykule scharakteryzowano wybrane metody służące do obliczania izolacyjności akustycznej przegród pojedynczych, składających się z dwóch warstw materiałów dźwiękoizolacyjnych. W tym celu wykorzystano model, w którym zastosowano prawo masy i badania symulacyjne. Celem artykułu jest pokazanie nowego podejścia w obliczeniu izolacyjności akustycznej pojedynczych przegród dwuwarstwowych niejednorodnych, opartego na modyfikacji modelu Davy, przeznaczonego do obliczania izolacyjności przegród pojedynczych jednorodnych. Weryfikację metod obliczeniowych przeprowadzono na przykładzie sześciu płyt gumowo-metalowych, mających zastosowanie jako elementy konstrukcyjne w obudowach dźwiękochłonoizolacyjnych, których izolacyjność akustyczna była wyznaczona w warunkach laboratoryjnych w ramach wcześniejszych badań.

### Opis badanych przegród

Przedmiotem badań było 6 pojedynczych niejednorodnych przegród dwuwarstwowych o wymiarach  $1 \times 2 \text{ m}$ . Pojedynczą przegrodę stanowiły dwie sklejone ze sobą płyty: płyta gumowa (guma lita lub guma EPDM 40) o różnej grubości oraz płyta stalowa, o grubości 1 mm. W tabeli 1. pokazano zestawienie danych materiałowych użytych do zbudowania tych płyt, między innymi takich, jak moduł Younga, współczynnik Poissona i współczynnik tłumienia. Parametry fizyczne użyto w dalszej kolejności do obliczeń izolacyjności akustycznej [12-14].

### Wyniki badań laboratoryjnych

Badania akustyczne przegród przeprowadzono w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH w Krakowie w laboratorium sprzężonych komór pogłosowych, przeznaczonych do wyznaczania izolacyjności akustycznej właściwej od dźwięków powietrznych. Wyniki badań zostały opublikowane przez Jana Sikorę [15]. Wymiary badanych przegród (próbek) dostosowane były do wymiarów okna pomiarowego laboratorium, które ma szerokość 1 m i wysokość 2 m. Przegrody w trakcie badań

akustycznych skierowane były warstwą gumową w stronę komory nadawczej. Badania izolacyjności akustycznej przeprowadzone zostały zgodnie z obowiązującymi normami [16,17].

Na rys. 1. pokazano charakterystyki izolacyjności akustycznej  $R$  w odniesieniu do trzech przegród dwuwarstwowych, gdzie warstwę gumową stanowiła guma lita o grubości 2,5, 5 i 10 mm, natomiast przedstawione na rys. 2. charakterystyki dotyczą trzech przegród zawierających warstwę gumy EPDM 40 o grubości 2,5, 5 i 10 mm, [15].

Porównując charakterystyki widmowe izolacyjności akustycznej w odniesieniu do badanych przegród gumowo-metalowych, pokazane na rys. 1. i 2., można stwierdzić, że przegrody, w skład których wchodziły warstwy z gumy litej oraz z gumy EPDM 40, cechują się podobnym charakterem krzywych izolacyjności  $R$ . Wynika to między innymi z podobnej gęstości dwóch zastosowanych rodzajów warstw gumowych (tabela 1.).

### Obliczenia izolacyjności akustycznej

Oprócz badań laboratoryjnych do wyznaczenia charakterystyki izolacyjności akustycznej przegród stosowane są także modele obliczeniowe. Do wykonania obliczeń izolacyjności akustycznej  $R$  niezbędna jest znajomość parametrów fizycznych przegród, między innymi takich jak gęstość materiału, moduł Younga, współczynnik Poissona i tłumienia. Parametry te mogą być wyznaczone na drodze badań laboratoryjnych. W przypadku przegród analizowanych w ramach artykułu, za wyjątkiem gęstości materiałów, za podstawę obliczeń przyjęto dostępne w literaturze przedmiotu parametry fizyczne, zamieszczone w tabeli 1.

Jednym z najbardziej znanych modeli do obliczenia izolacyjności akustycznej jest model, w którym wykorzystywane jest prawo masy, stosowane jest do przegród jednorodnych [6-7, 10-13]. Przy pominięciu zjawiska rezonansu przestrzennego pomiędzy falami dźwiękowymi w ośrodku powietrznym a falami giętymi w przegrodzie, zwanego zjawiskiem koincydencji, które powoduje obniżenie izolacyjności akustycznej w stosunku do pewnej częstotliwości, stosując prawo masy można otrzymać z pewnym, wystarczającym niekiedy, przybliżeniem wartości izolacyjności akustycznej. Zjawisko koincydencji omówione jest szerzej w publikacjach [10, 11, 12, 13, 18].

Model stosowany do obliczeń izolacyjności akustycznej przegród jednorodnych, w którym

wykorzystywane jest prawo masy, może mieć również zastosowanie do przybliżonego wyznaczenia charakterystyki izolacyjności akustycznej w przypadku przegród dwuwarstwowych, według wzorów (1) i (2) [13]:

$$R = 10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{\pi f M_P}{\rho_0 c_0} \right)^2 \right] - 5, \text{ dB} \quad (1)$$

gdzie:  $c_0$  – prędkość dźwięku w powietrzu, m/s,  $\rho_0$  – gęstość powietrza, kg/m<sup>3</sup>,  $M_P$  – masa powierzchniowa przegrody dwuwarstwowej, kg/m<sup>2</sup>,  $f$  – częstotliwość, Hz.

$$M_P = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 \quad (2)$$

gdzie:  $\rho_1, \rho_2$  – gęstość materiałów 1 i 2,  $h_1, h_2$  – grubość materiałów 1 i 2.

Częstotliwość krytyczna (koincydencji) w odniesieniu do przegrody dwuwarstwowej obliczana jest na podstawie wzoru:

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \left( \frac{M_P}{B} \right)^{1/2} \quad (3)$$

gdzie:  $B$  – sztywność przegrody dwuwarstwowej, Nm [13].

W przypadku sześciu analizowanych przegród gumowo-metalowych A÷F (oznaczenia przegród, jak w tabeli 1.) wyznaczono ich częstotliwości koincydencji, których wartości pokazano w tabeli 2.

Jak wynika z tabeli 2., najmniejsza wartość częstotliwości koincydencji wynosi  $f_c=14,2$  kHz, natomiast zakres częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktaowych, w których przeprowadzono badania laboratoryjne, obejmuje wartości od 63 Hz do 5 kHz. Zatem, zjawisko koincydencji, nie uwzględniane w modelu obliczeniowym, wykorzystującym prawo masy oraz będące poza zakresem przedmiotowych częstotliwości w przypadku analizowanych przegród gumowo-metalowych, nie ma wpływu na obniżenie wartości izolacyjności akustycznej. Stąd, wykorzystanie tego modelu do obliczeń izolacyjności akustycznej analizowanych przegród dwuwarstwowych może stanowić wystarczająco dobre przybliżenie.

Oprócz modelu, w którym do wyznaczania izolacyjności akustycznej wykorzystywane jest prawo masy można użyć modele obliczeniowe opracowane przez Davy [12]. Jeden z tych modeli dotyczy przegród pojedynczych jednorodnych. Wykorzystanie tego modelu do obliczeń izolacyjności akustycznej przegród stosowanych w zabezpieczeniach wibroakustycznych pokazano w publikacji [7]. Badania tam opisane potwierdziły, że wykorzystanie modelu Davy daje lepszą zgodność z wynikami otrzymanymi z badań laboratoryjnych w odniesieniu do częstotliwości niższych, w porównaniu do modelu opracowanego przez Sharpa. Model Davy, w odróżnieniu od modelu, w którym wykorzystuje się prawo masy, uwzględnia wymiary przegrody, a także obniżenie izolacyjności akustycznej, spowodowane zjawiskiem koincydencji.

Do obliczeń izolacyjności akustycznej przegród dwuwarstwowych gumowo-metalowych warto zastosować model Davy, opracowany w odniesieniu do przegród pojedynczych jednorodnych. W przypadku analizowanych sześciu przegród gumowo-metalowych, do obliczenia izolacyjności akustycznej w zakresie 50 Hz ÷ 5 kHz wystarczy zastosowanie wzoru Davy w odniesieniu do zakresu częstotliwości  $f \leq 0,8 f_c$  [12] (częstotliwości koincydencji analizowanych przegród dwuwarstwowych pokazano w tabeli 2). Izolacyjność akustyczną  $R$  przegród dwuwarstwowych gumowo-metalowych, można obliczyć z zależności:

$$R = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{\pi f M_P}{\rho_0 c_0} \right)^2 \right] + 20 \log \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \right] - 10 \log \left[ \ln \left( \frac{1+a^2}{1+a^2 \cos^2 \theta_L} \right) \right], \text{ dB} \quad (4)$$

$$\text{gdzie: } a = \left( \frac{\pi f M_P}{\rho_0 c_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$\theta_L = \cos^{-1} \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi\sqrt{A}}} \quad (6)$$

gdzie:  $A$  – powierzchnia przegrody, m<sup>2</sup>,  $\lambda$  – długość fali dźwiękowej, m.

Izolacyjność akustyczna może być także obliczona przy wykorzystaniu badań symulacyjnych, co w artykule potraktowano jako trzeci ze sposobów obliczeniowych, który może być użyty do analiz porównawczych z badaniami laboratoryjnymi. Wykorzystany przez Autorów program jest przeznaczony do symulacji parametrów akustycznych związanych z pochłanianiem, odbiciem i przenoszeniem dźwięku przez struktury wielowarstwowe. Obliczenia charakterystyki izolacyjności akustycznej (ang. *Transmission Loss factor*, TL) w odniesieniu do sześciu przedmiotowych przegród gumowo-metalowych z użyciem programu komputerowego przeprowadzono w stosunku do warunków pola pogłosowego, w pasmach 1/3 oktaowych o częstotliwościach środkowych z przedziału od 50 Hz do 5 kHz, zachowując parametry obliczanych struktur dwuwarstwowych zgodne z parametrami przegród, pokazanymi w tabeli 1.

### Wyniki obliczeń izolacyjności akustycznej

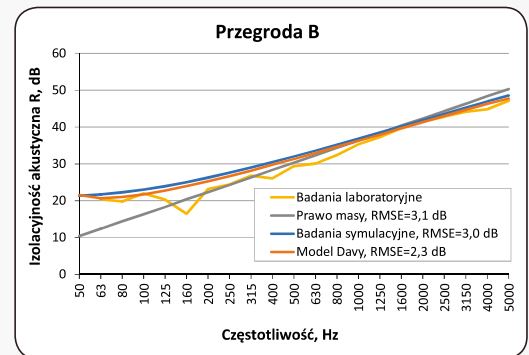
Na rys. 3÷8. pokazano wyniki obliczeń izolacyjności akustycznej  $R$  w funkcji częstotliwości, w odniesieniu do sześciu analizowanych przegród A÷F, o parametrach i oznaczeniach pokazanych w tabeli 1. Otrzymane charakterystyki izolacyjności akustycznej odniesiono do charakterystyki uzyskanej z badań laboratoryjnych.

Na rys. 9. przedstawiono porównanie uśrednionych wartości błędów obliczeniowych (ang. *Root Mean Squared Error*, RMSE) izolacyjności akustycznej sześciu przegród dwuwarstwowych gumowo-metalowych, otrzymanej z użyciem modelu obliczeniowego opartego na prawie masy, modelu Davy i badania symulacyjne w odniesieniu do wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych.

Z porównania różnic wyników obliczeń i wyników laboratoryjnych (rys. 9.) można stwierdzić, że uśrednione błędy obliczeniowe oscylują wokół wartości 3 dB. Najlepsze rezultaty przybliżenia obliczonej charakterystyki izolacyjności akustycznej (o częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktaowych z zakresu od 63÷5000 Hz) w porównaniu z badaniami laboratoryjnymi uzyskano wykorzystując model Davy (RMSE=2,8 dB), adaptowany w artykule do przegród dwuwarstwowych. Zastosowanie modelu, w którym wykorzystuje się prawo masy do przybliżenia charakterystyk widmowych przegród, w analizowanym zakresie częstotliwości, obarczone jest największym błędem (RMSE=3,4 dB).

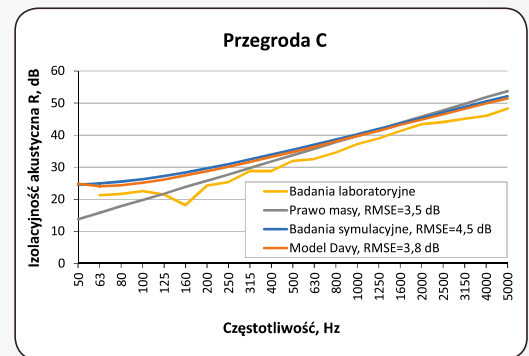
Największe wartości błędów (RMSE≈3,5÷4 dB) w odniesieniu do wszystkich metod obliczeniowych dotyczą przegród C i F (rys. 5 i 8.), czyli zawierających najgrubszą warstwę gumy (10 mm).

Na podstawie charakterystyk izolacyjności akustycznej obliczono jednolickowe ważne wskaźniki



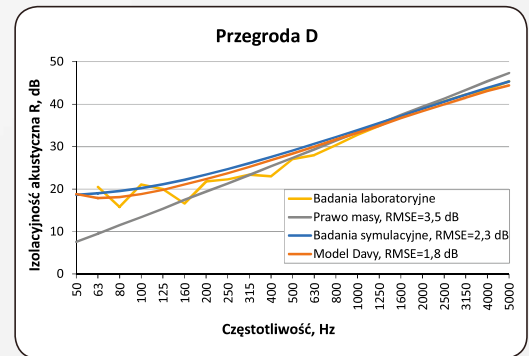
Rys. 4. Charakterystyki izolacyjności akustycznej przegrody B, wyznaczone z badań symulacyjnych, modelu wykorzystującego prawo masy i modelu Davy oraz z badań laboratoryjnych

Fig. 4. Sound insulation characteristics for the B baffle, determined from simulation tests, mass law and Davy model, and from laboratory tests



Rys. 5. Charakterystyki izolacyjności akustycznej przegrody C, wyznaczone z badań symulacyjnych, modelu wykorzystującego prawo masy i modelu Davy oraz z badań laboratoryjnych

Fig. 5. Sound insulation characteristics for the C baffle, determined from simulation tests, mass law and Davy model, and from laboratory tests

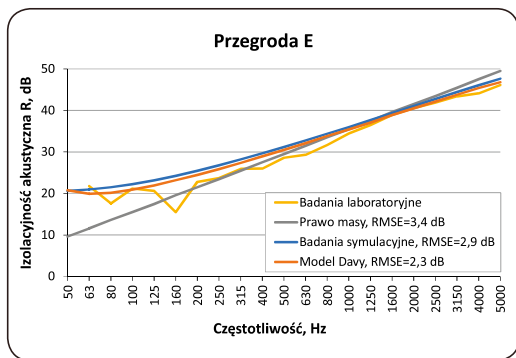


Rys. 6. Charakterystyki izolacyjności akustycznej przegrody D, wyznaczone z badań symulacyjnych, modelu wykorzystującego prawo masy i modelu Davy oraz z badań laboratoryjnych

Fig. 6. Sound insulation characteristics for the D baffle, determined from simulation tests, mass law and Davy model, and from laboratory tests

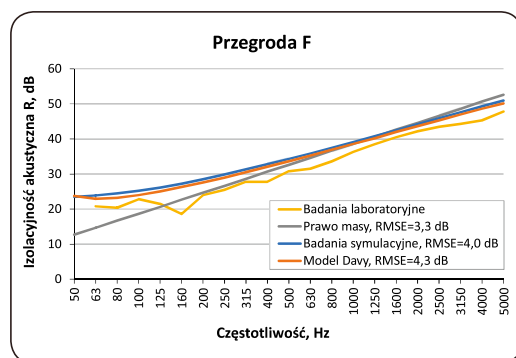
izolacyjności  $R_w$ , wraz z widmowymi wskaźnikami adaptacyjnymi  $C_i$  i  $C_{tr}$ , uwzględniającymi charakterystykę źródła hałasu, do którego dobiera się przegrodę dźwiękoizolacyjną, dla badanych przegród dwuwarstwowych, co pokazano w tabeli 3. Wskaźnik  $C$  oblicza się w odniesieniu do widma „szumu różowego” skorygowanego charakterystyką A, natomiast wskaźnik  $C_{tr}$  oblicza się w odniesieniu do widma hałasu drogowego, również skorygowanego charakterystyką A.

Wartości średnich błędów bezwzględnych różnic wartości  $R_w$  obliczonych i otrzymanych z badań laboratoryjnych wynoszą, w odniesieniu do badań



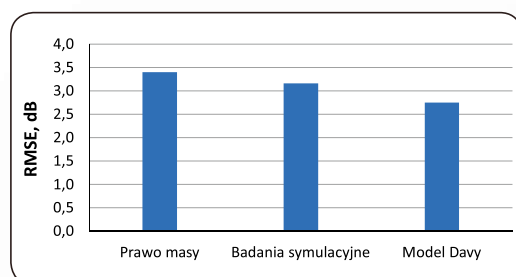
Rys. 7. Charakterystyki izolacyjności akustycznej przegrody E, wyznaczone z badań symulacyjnych, modelu wykorzystującego prawo masy i modelu Davy oraz z badań laboratoryjnych

Fig. 7. Sound insulation characteristics for the E baffle, determined from simulation tests, mass law and Davy model, and from laboratory tests



Rys. 8. Charakterystyki izolacyjności akustycznej dla przegrody F, wyznaczone z badań symulacyjnych, prawa masy i modelu Davy oraz z badań laboratoryjnych

Fig. 8. Sound insulation characteristics for the F baffle, determined from simulation tests, mass law and Davy model, and from laboratory tests



Rys. 9. Porównanie uśrednionych błędów obliczeniowych (RMSE) izolacyjności akustycznej przegród dwuwarstwowych gumowo-metalowych, z użyciem modelu, w którym wykorzystywane jest prawo masy, modelu Davy i badań symulacyjnych

Fig. 9. Comparison of average computational errors (RMSE) of sound insulation of two-layer rubber and metal baffles, using mass law models, Davy and simulation tests

symulacyjnych i modelu, w którym wykorzystywane jest prawo masy oraz modelu Davy odpowiednio: 3,3, 1,3 i 2,5 dB. Największe rozbieżności obliczonych wskaźników  $R_w$ , w odniesieniu do  $R_w$  obliczonego na podstawie wyników z badań laboratoryjnych, dotyczą przegród z największą grubością warstwy gumowej (przegroda C i F, tabela 3).

Z danych pokazanych w tabeli 3 wynika, że model, w którym wykorzystywane jest prawo masy, najlepiej spośród analizowanych metod obliczeniowych, przybliży wartości wskaźnika  $R_w$ . Wskaźnik  $R_w$  oblicza się dla zakresu częstotliwości 100 do 3150 Hz. Natomiast zastosowanie modelu, w którym wykorzystywane jest prawo masy w odniesieniu do przegród dwuwarstwowych gumowo-

Tabela 3. Jednoczynnikowe ważone wskaźniki  $R_w$ , wraz z widmowymi wskaźnikami adaptacyjnymi C i  $C_w$ , obliczone dla badanych przegród gumowo-metalowych

Table 3. Single number weighted  $R_w$  indices with spectral adaptive indices C and  $C_w$ , calculated for the tested rubber and metal baffles

Oznaczenie przegrody	Rodzaj warstwy gumowej	Grubość warstwy gumowej, mm	Badania laboratoryjne			Badania symulacyjne			Prawo masy			Model Davy		
			$R_w$ , dB	C, dB	$C_w$ , dB	$R_w$ , dB	C, dB	$C_w$ , dB	$R_w$ , dB	C, dB	$C_w$ , dB	$R_w$ , dB	C, dB	$C_w$ , dB
A	Guma lita	2,5	32	-1	-4	34	-1	-4	32	-1	-5	33	-1	-4
B		5	33	-1	-4	36	0	-3	34	-1	-5	36	-1	-4
C		10	35	-1	-4	40	-1	-4	38	-1	-5	39	-1	-4
D	Guma EPDM 40	2,5	31	-1	-4	34	-1	-4	32	-2	-6	33	-1	-4
E		5	33	-1	-5	36	-1	-4	34	-2	-6	35	-1	-4
F		10	35	-1	-5	39	-1	-4	37	-2	-5	38	-1	-4

-metalowych do odwzorowania charakterystyki widmowej izolacyjności akustycznej przyniosło najslabsze efekty w porównaniu do pozostałych modeli obliczeniowych. Jest to spowodowane znacznymi różnicami wartości  $R$  w zakresie niskich częstotliwości. Pozostałe analizowane metody obliczeniowe, takie jak badania symulacyjne, jak i model Davy, lepiej odwzorowują wartości  $R$  w przypadku pasm częstotliwości niższych, w odniesieniu do badań laboratoryjnych, przy czym należy wziąć pod uwagę fakt, że w tym zakresie częstotliwości ( $f < 160$  Hz) wyniki badań laboratoryjnych obarczone są stosunkowo dużymi błędami niepewności pomiaru.

Na różnice wyników obliczeń i wyników laboratoryjnych mógł mieć wpływ przede wszystkim brak dokładnej informacji o właściwych danych materiałowych badanych przegród. Dane materiałowe, niezbędne do obliczeń zaczerpnięte były z literatury.

### Podsumowanie

W artykule pokazano, że oprócz badań laboratoryjnych, do wyznaczania charakterystyki izolacyjności akustycznej przegród dwuwarstwowych mogą mieć zastosowanie modele obliczeniowe. Na przykładzie sześciu przegród dwuwarstwowych, których właściwości akustyczne wyznaczono w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH w ramach wcześniejszych badań, zweryfikowano podstawowy model obliczeniowy, w którym wykorzystywane jest prawo masy. Do obliczeń izolacyjności akustycznej wykorzystano również badania symulacyjne oraz zaproponowany nowy model obliczeniowy, adaptując do tego celu model Davy, przeznaczony do przegród pojedynczych jednorodnych.

Badania wykazały, że w przypadku dwuwarstwowych przegród gumowo-metalowych stosunkowo prosty do zastosowania model, w którym wykorzystywane jest prawo masy daje dobre rezultaty szczególnie w obliczeniach ważonego wskaźnika jednoczynnikowego  $R_w$ .

Z przeprowadzonych analiz wynika, że do przybliżenia charakterystyki widmowej przegród dwuwarstwowych gumowo-metalowych może mieć zastosowanie zmodyfikowany model Davy, przeznaczony do pojedynczych przegród jednorodnych. Zastosowanie takiego modelu dało mniejszy błąd obliczeniowy niż wyniki uzyskane za pomocą badań symulacyjnych.

### BIBLIOGRAFIA

[1] ENGEL Z., ZAWIESKA, W. Hałas i drgania w procesach pracy - źródła, ocena, zagrożenia [Noise and vibrations in work processes - sources, evaluation, hazards] CIOP-PiB, Warszawa 2010.  
 [2] SIKORA, J. Przegrody warstwowe stosowane w rozwiązaniach ograniczających hałas maszyn i urządzeń [Layered baffles in solutions restricting the noise of machinery and tools] Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2012, 491, 8:26-31.

[3] SIKORA, J., KOSAŁA, K. Rozwiązania ograniczające hałas uderzeniowy prasy mechanicznej [Solutions to reduce impact noise of mechanical press] Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2002, 369, 4:21-24.

[4] ENGEL, Z., SIKORA, J. Obudowy dźwiękochłonna-izolacyjne: podstawy projektowania i stosowania [Absorbing-insulating sound covers: design and use basics] Wyd. AGH, Kraków 1998.

[5] MORZYŃSKI, L., KRUKOWICZ, T. Dwuwarstwowa struktura aktywna do ograniczania transmisji hałasu przez obudowy i przegrody dźwiękoizolacyjne [Double-layered active structure for reducing noise transmission through sound insulating barriers] Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka 2017, 553, 10:24-28.

[6] SIKORA, J. Warstwy gumowe w rozwiązaniach zabezpieczeń wibroakustycznych [Rubber layers in vibroacoustic provisions] Wyd. AGH, Kraków 2011.

[7] Kosała, K. Calculation models for analyzing the sound insulating properties of homogeneous single baffles used in vibroacoustic protection. Applied Acoustics 2019, 146:108-117.

[8] MAJKUT, L., OLSZEWSKI, R. Modelowanie izolacyjności akustycznej przegród jednorodnych [Modelling the acoustic insulation of homogeneous baffles] Autobusy. Eksploatacja i Testy 2018, 12:553-556.

[9] KOSAŁA, K., MAJKUT, L., OLSZEWSKI, R. Modelowanie izolacyjności akustycznej przegród Metodą Statystycznej Analizy Energii [Modelling the acoustic insulation of baffles with the use of the Statistical Analysis of Energy Method] Autobusy. Eksploatacja i Testy 2018, 12:106-109.

[10] SADOWSKI, J. Podstawy izolacyjności akustycznej ustrojów [Basics of the acoustic insulation of sections] Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1973.

[11] NURZYŃSKI, J. Akustyka w budownictwie. PWN, Warszawa 2018.

[12] BIES, D.A., HANSEN, C.H. Engineering noise control, theory and practice. Spon Press, London and New York 2009.

[13] Barron, R.F. Industrial Noise Control and Acoustics. CRC Press, New York 2003.

[14] FASOLD, W., SONNTAG, W., and WINKLER, H. Bau und Raumakustik. Verlag Bauwesen, Berlin 1987.

[15] SIKORA, J. Wytyczne dla projektantów zabezpieczeń wibroakustycznych dotyczące możliwości stosowania nowego zestawu dźwiękochłonna-izolacyjnych przegród warstwowych [Guidelines to design of vibroacoustic provisions related to the possibility of the use of new sets of layered absorbing-insulating baffles] Wyd. AGH, Kraków 2013.

[16] PN-EN ISO 10140-2:2011. Akustyka - Pomiar laboratoryjny izolacyjności akustycznej elementów budowlanych - Część 2: Pomiar izolacyjności od dźwięków powietrznych.

[17] PN-EN ISO 717-1:2013-08. Akustyka - Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach

i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych - Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych.

[18] MAJKUT, L. Analiza teoretyczna zjawiska koincydencji i częstości krytycznych paneli akustycznych [Theoretical analysis of the coincidence phenomenon and critical frequencies of acoustic panels] Autobusy. Eksploatacja i Testy 2018, 12:549-552.

Artykuł powstał w ramach działalności statutowej AGH w Krakowie, Katedry Mechaniki i Wibroakustyki nr 11.11.130.734.