

Modelowanie izolacyjności akustycznej przegród warstwowych

JEL: R41 DOI: 10.24136/atest.2019.246

Data zgłoszenia: 28.01.2020 Data akceptacji: 10.02.2020

W artykule, do wyznaczania izolacyjności akustycznej przegród warstwowych, wykorzystano podstawowe metody teoretycznego wyznaczania izolacyjności akustycznej właściwej przegród jednorodnych. Niezbędne do obliczeń wartości wielkości wykorzystywanych w modelach wyznaczono w wyniku homogenizacji. W pracy autor rozważania ograniczył do modeli opartych na wykorzystaniu impedancji mechanicznej przegrody. Przegrodę zamodelowano jako: bryła sztywna, odkształcalna płyta cienka (opisana modelem Kirchhoffa-Love'a) i gruba (model Mindlina – Reissnera).

Słowa kluczowe: izolacyjność akustyczna, przegrody warstwowe, modelowanie, homogenizacja.

Wstęp

Występujący powszechnie hałas jest jednym z bardziej znaczących czynników wpływających na jakość życia człowieka współczesnego. Nadmierny hałas ma również decydujący wpływ na komfort życia i wypoczynku. Szczególnie niebezpieczny wpływ nadmierny hałas może mieć na kierowców pojazdów, który w połączeniu z drganiami pojazdu wpływa na obniżenie nie tylko komfortu podróży, ale również na poziom koncentracji i zmęczenia kierowcy, co z kolei może prowadzić do powstania wielu niebezpiecznych sytuacji na drodze.

Najbardziej skuteczną metodą ograniczenia hałasu jest ograniczenie u źródła, czyli takie konstruowanie mechanizmów, urządzeń i maszyn, by emitowały maksymalnie najmniejszą ilość energii akustycznej. Jeśli tego typu zabiegi są niewystarczające, należy zastosować metody modyfikujące drogi rozchodzenia się dźwięku, czyli m.in. zastosowanie obudów izolacyjnych. Jak wynika z wcześniejszych prac autora [11] izolacyjność akustyczna przegrody rośnie wraz ze wzrostem masy przegrody. Niestety tego typu rozwiązania nie są możliwe w konstrukcjach pojazdów. Konstrukcje te muszą spełniać odpowiednie warunki zapewniające bezpieczeństwo kierowcy i pasażerów. Jednocześnie, ze względu na koszty eksploatacji, tak skonstruowane pojazdy powinny być możliwie lekkie. Z tego powodu przegrody akustyczne w pojazdach tworzy się jako przegrody warstwowe, np. do metalowej konstrukcji przykleja się warstwę gumy.

W literaturze znaleźć można wiele różnych modeli izolacyjności akustycznej dla przegród jednorodnych [2,3,4,7,11] tzn. wykonanych z jednego materiału. Ten fakt był przesłanką dla opisanych w artykule prac autora polegających na wyznaczeniu zastępczych modeli przegród warstwowych (w przedstawionej pracy ograniczono się do przegród dwuwarstwowych). Po zastosowaniu różnych metod homogenizacji wyznaczone parametry wykorzystano do wyliczenia izolacyjności akustycznej dla zastępczego modelu jednorodnego.

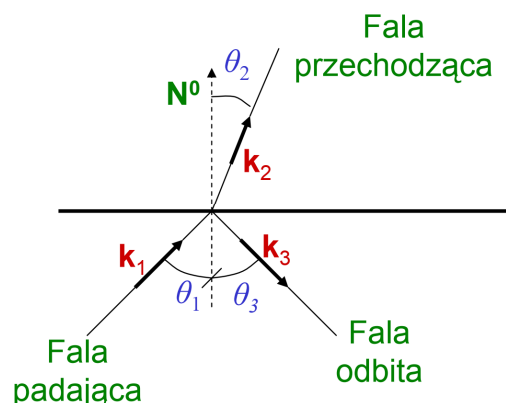
W pracy opisano kilka podstawowych modeli pozwalających na teoretyczne wyznaczenie izolacyjności akustycznej właściwej R przegrody jednorodnej

W niniejszej pracy uwzględniono jedynie tzw. cienkie przegrody, tzn. takie, dla których w całym zakresie analizowanych częstotliwości (najczęściej pomiędzy 100 i 5000 Hz) nie występuje zjawisko koincydencji (więcej o tym zjawisku i wyznaczaniu częstotliwości,

przy której to zjawisko występuje znaleźć można w [12]). Taki podział przegród na cienkie i grube pokrywa się również z ich zastosowaniami, tzn. przegrody cienkie wykorzystuje się na konstrukcje obudów maszyn i urządzeń, przegrody grube na ekrany akustyczne.

1. Izolacyjność akustyczna przegrody

Zjawisko przenikania (przechodzenia) energii akustycznej przez przegrodę jest bardzo skomplikowane i złożone. Niemal wszystkie modele teoretyczne opisujące to zjawisko (w tym wszystkie opisane w niniejszej pracy) zakładają, że fala akustyczna przenika przez przegrodę przede wszystkim wskutek drgań przegrody. Zakłada się, że fala pada na przegrodę i pobudza ją do drgań mechanicznych, drgania te z kolei są źródłem fal akustycznych po obu stronach przegrody, tj. fali odbitej (pozostającej po stronie źródła) i fali przechodzącej (transmitowanej) do chronionego ośrodka (poza obudowę izolacyjną). W modelach tych pomija się zjawisko sprzężenia pomiędzy ośrodkiem gazowym (fala akustyczna) i ośrodkiem stałym (przegroda) i to po obu stronach przegrody.



Rys. 1. Prosty model fali padającej na przegrodę (przegroda oznaczona poziomą linią ciągłą)

Izolacyjność akustyczna właściwa R przegrody zdefiniowana jest jako stosunek całkowitej energii fali akustycznej padającej na przegrodę (fali padającej) E_1 do całkowitej energii akustycznej przenikającej przez przegrodę (fali przechodzącej) E_2 i wyraża się wzorem [2,4]:

$$R = 10 \log \frac{E_1}{E_2} \quad (1)$$

Przy warunku polegającym na założeniu, że pola powierzchni panelu po stronie fali padającej i po stronie fali przechodzącej są równe, w miejsce energii akustycznej wstawić można natężenie fali akustycznej I . Warunek równości powierzchni jest zawsze spełniony, trudno sobie wyobrazić by jakaś obudowa była tak skonstruowana by, któraś z jej ścian miała inną powierzchnię od strony wewnętrznej (od strony maszyny) i inną od strony zewnętrznej (obszaru chronionego). W takim przypadku izolacyjność akustyczna wyraża się wzorem [2,4]:

$$R = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (2)$$

gdzie:

I_1 - natężenie dźwięku fali padającej na przegrodę,
 I_2 - natężenie dźwięku fali przenikającej przez przegrodę,
 τ - współczynnik przenikalności.

Kolejnym założeniem każdego z modeli teoretycznych jest przyjęcie dużej odległości źródła od przegrody i co za tym idzie założenie, że fala akustyczna jest falą płaską. Z tego założenia wynika zależność pomiędzy ciśnieniem akustycznym i prędkością cząstki (autor świadomie unika pojęcia impedancji fali akustycznej, rezerwując go jedynie do impedancji przegrody). Zależność dla fali płaskiej wyraża się zależnością:

$$p = \rho_0 c v \quad (3)$$

gdzie:

p - ciśnienie akustyczne,
 ρ_0 - gęstość powietrza,
 c - prędkość dźwięku,
 v - prędkość cząstki akustycznej.

Wykorzystując zależność (3) współczynnik przenikalności τ z równania (2) wyrazić można zależnością:

$$\tau = \frac{I_2}{I_1} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \frac{p_2^2}{p_1^2} \quad (4)$$

Przyjmując przebiegi okresowe każdej z fal (oznaczenia na rys. 1) ich przebieg można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} p_1 &= A e^{i\omega t - kx} \\ p_2 &= B e^{i\omega t - kx} \\ p_3 &= C e^{i\omega t - kx} \end{aligned} \quad (5)$$

Z drugiej zasady dynamiki Newtona wynika, że różnica ciśnień po obu stronach przegrody działających na jednostkę powierzchni tej przegrody jest równa iloczynowi impedancji przegrody Z i prędkości średniej v_p analizowanej jednostki powierzchni przegrody. Przy przyjętych oznaczeniach dynamiczne równanie ruchu zapisać można w postaci:

$$\Delta p = (A + B - C) = Z v_p \quad (6)$$

Ze względu na to, że prędkości cząstek akustycznych na obu powierzchniach przegrody są równe prędkości samej przegrody, zależność między nimi opisane jest zależnością:

$$v_p = v_1 - v_3 = v_2 \quad (7)$$

Wykorzystując zależności (3), (6) i (7), po kilku przekształceniach (po uwzględnieniu, że $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$) współczynnik przenikalności wyraża się zależnością:

$$\tau_\theta = \frac{p_2^2}{p_1^2} = \left[\frac{1}{1 + \frac{Z \cos(\theta)}{2 \rho_0 c}} \right]^2 \quad (8)$$

W dalszej części pracy opisane zostały podstawowe metody modelowania przegrody i wyznaczania jej impedancji.

2. Modele przegrody pozwalające na wyznaczenie impedancji

W tym punkcie pracy opisano trzy różne modele przegrody, która traktowana jest jako płyta sztywna lub odkształcalna. W przypadku modelu płyty odkształcalnej w pracy przyjęto model płyty cienkiej (opisanej modelem Kirchhoffa-Love'a) i grubej (model Mindlina - Reissnera).

Poszukiwaną impedancję wyznaczyć można zarówno metodami analitycznymi, jak i numerycznymi.

2.1. Płyta (bryła) sztywna - Prawo Masy

W przypadku prawa masy przegrodę modeluje się jako bryłę sztywną. W takim przypadku impedancja takiej przegrody wyraża się zależnością:

$$Z = i \omega \mu \quad (9)$$

gdzie: μ - masa jednostki powierzchni przegrody (w literaturze spotyka się również nazwę masa powierzchniowa).

W prawie masy przyjmuje się, że $i \omega \mu / 2 \rho_0 c \ll 1$ co prowadzi do uproszczenia zależności (8) do postaci:

$$\tau_\theta = \left[\frac{2 \rho_0 c}{\omega \mu \cos(\theta)} \right]^2 \quad (10)$$

gdzie:

τ_θ - współczynnik przenikalności przegrody dla fali akustycznej padającej pod kątem θ w stosunku do normalnej do przegrody (rys.1)

W takim przypadku izolacyjność akustyczną właściwą przegrody wyznacza się z zależności:

$$R_\theta = 20 \log \frac{\omega \mu \cos(\theta)}{2 \rho_0 c} \quad (11)$$

Jest to izolacyjność akustyczna przegrody w przypadku fali padającej pod kątem θ (kątem mierzony do normalnej do przegrody). W przypadku izolacyjności akustycznej zawsze interesujące jest ile ona wynosi w przypadku pola rozproszonego (fale padają z każdego kierunku). W przypadku prawa masy przyjmuje się że wystarczy wyznaczyć izolacyjność dla $\theta=90^\circ$ i od wyniku odjąć 5 dB, czyli:

$$R = 20 \log \frac{\omega \mu}{2 \rho_0 c} - 5 \quad (12)$$

W literaturze spotyka się również zależność [3]:

$$R = 20 \log (f \mu) - 47,5 \quad (13)$$

gdzie:

f - to częstotliwość fali akustycznej (częstotliwość wymuszenia
 μ - masa jednostki powierzchni przegrody

Równanie (13) wynika wprost z równania (12) po przyjęciu i podstawieniu wartości impedancji akustycznej powietrza, tj. $\rho_0 c = 415 \text{ Ns/m}^3$.

2.2. Cienka płyta odkształcalna - model Kirchhoffa-Love'a

Inną metodą poszukiwania impedancji przegrody jest wykorzystanie dynamicznego modelu płyty cienkiej. Drgania wymuszone takiej płyty opisane są równaniem Kirchhoffa-Love'a w postaci:

$$\nabla^4 w + \frac{\rho h}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \Delta p \quad (14)$$

gdzie:

D - sztywność płytowa,

ρ - gęstość materiału przegrody,

h - grubość płyty (przegrody),

Δp - opisana powyżej (rów. (6)) różnica ciśnień po obu stronach przegrody.

Przyjmując rozwiązanie równania (14) w postaci:

$$w(x, y, t) = W e^{i\omega t - k_x x - k_y y} \quad (15)$$

gdzie:

$k_x^2 + k_y^2 = k^2$, k to liczba falowa, a k_x i k_y to jej składowe na kierunkach odpowiednio x i y

wyznaczyć można impedancję przegrody modelowanej jako cienka płyta:

$$Z = \frac{D}{i\omega} \left(k_x^4 - \omega^2 \frac{\rho h}{D} \right) \quad (16)$$

W literaturze spotyka się również zależność [9]:

$$Z = \frac{\omega^3 D}{c^4} \sin^4 \theta \quad (17)$$

wszystkie oznaczenia jak wyżej.

2.3. Gruba płyta odkształcalna – model Mindlina – Reissnera

Przegrodę modelować można również jako płytę grubą czyli wykorzystać model Mindlina – Reissnera, w którym uwzględnia się dodatkowo naprężenia styczne i odkształcenia postaciowe. Dynamiczne równanie ruchu takiej płyty ma postać:

$$\nabla^4 w + \frac{\rho h}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\rho h}{G} \frac{\partial^2 (\nabla^2 w)}{\partial t^2} = \Delta p \quad (18)$$

gdzie: G - moduł Kirchhoffa, pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Wykorzystując rozwiązanie w takiej samej postaci jak dla płyty cienkiej uzyskano impedancję tak modelowanej przegrody w postaci:

$$Z = \frac{G h \omega \sin^2 \theta}{c^2} \quad (19)$$

wszystkie oznaczenia jak wyżej.

2.4. Metody numeryczne

Do wyznaczenia impedancji mechanicznej przegrody można wykorzystać również metody numeryczne m.in. Metoda Elementów Skończonych [5] czy metody bezsiatkowe [9]. Metody te wykorzystuje się głównie do wyznaczenia impedancji przegród dwucienkich i warstwowych. Dysponując pakietami komercyjnymi czy własnymi programami można również symulować całe zjawisko przenoszenia dźwięku przez przegrodę, tj. całość „od źródła do odbiornika”. W tym celu wykorzystać można Metodę Elementów Skończonych [5], metody bezsiatkowe [9], Metodę Elementów Brzegowych czy Statystyczną Analizę Energii [11].

3. Pole dyfuzyjne

Zależność (8) pozwala na wyznaczenie izolacyjności akustycznej przy założeniu fali padającej pod jednym kątem θ liczoną do normalnej do przegrody. Chcąc wyznaczyć izolacyjność akustyczną materiału niezbędne jest uwzględnienie pola dyfuzyjnego, tzn. uwzględnienie fal padających ze wszystkich kierunków i „dodanie” ich. Innymi słowy, każdy punkt (jednostka powierzchni) wymuszony jest do drgań falami akustycznymi „przychodzącymi” ze wszystkich kierunków. Niezbędne jest więc całkowanie zależności (8) dla wszystkich kątów azymutu i wszystkich odległości zenitalnych (do obliczeń najwygodniej jest przyjąć opis we współrzędnych sferycznych).

Po wyznaczeniu izolacyjności akustycznej jednostki powierzchni dla pola dyfuzyjnego niezbędne jest „sumowanie” wszystkich jednostkowych powierzchni przegrody czyli całkowanie „po całej powierzchni” przegrody.

3.1. Całkowanie (sumowanie) fal padających ze wszystkich kierunków

W przypadku pola dyfuzyjnego należy wyznaczyć całkę (sumę) fal padających na analizowaną jednostkę powierzchni ze wszystkich możliwych kierunków, czyli (całkowanie we współrzędnych sferycznych):

$$\tau_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\eta \int_0^{\pi/2} \tau_\theta d\theta \quad (20)$$

gdzie:

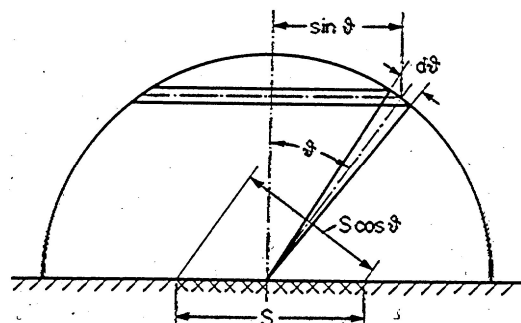
η - kąt azymutalny,

θ - odległość zenitalna,

τ_θ - współczynnik przenikalności przegrody dla fali padającej pod kątem θ - równanie (8).

W celu wyznaczenia sumy fal padających ze wszystkich kierunków posłużono się analogią znaną ze Statystycznej Analizy Energii, gdzie wyznacza się przyrost energii dE w zależności od przyrostu odległości zenitalnej $d\vartheta$ w stosunku do całkowitej energii E wyznaczonej na sferze (opis we współrzędnych sferycznych).

Na rys. 2 przedstawiono schematycznie przyrost wartości energii dE w funkcji przyrostu odległości zenitalnej od wartości ϑ do $\vartheta + d\vartheta$.



Rys 2. Schemat pomocny w całkowaniu pola dyfuzyjnego

Ten przyrost energii jest równy polu powierzchni wycinka sfery odpowiadającego kątowi ϑ i $\vartheta + d\vartheta$ podzielonemu przez całkowitą powierzchnię sfery, czyli:

$$\frac{dE}{E} = \frac{2\pi r \sin(\vartheta) r d\vartheta}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} \sin \vartheta d\vartheta \quad (21)$$

Uwzględniając rozumowanie z rys. 2 i równanie (21) całkę (20) przekształcić można do postaci:

$$\tau_d = \int_0^1 \tau_\theta d(\sin^2 \theta) \quad (22)$$

3.2. Całkowanie (sumowanie) „po” całej powierzchni przegrody

Podobnie jak w przypadku konieczności uwzględnienia pola dyfuzyjnego po stronie źródła przegrody tak niezbędne jest uwzględnienie faktu, że do odbiornika fale docierają ze wszystkich kierunków. Opierając się na zasadzie wzajemności łatwo dowiedzieć, że obie całki są sobie równe. Jeżeli obie powierzchnie przegrody (od strony źródła i od strony odbiornika) są takie same, to nie ma konieczności całkowania „po” całej powierzchni przegrody.

4. Metody homogenizacji

Jak łatwo zauważyć ze wzorów (13, 16 i 19) wynika, że do wyznaczenia wartości izolacyjności akustycznej przegrody jednorodnej niezbędna jest znajomość masy i modułu Younga (lub Kirchhoffa) dla materiału, z którego wykonana jest przegroda.

W przypadku przegrody dwuwarstwowej każdy z materiałów ma „swoje” wartości tych wielkości. W niniejszej pracy autor proponuje budowę modelu zastępczego przegrody dwuwarstwowej w postaci modelu jednorodnego, którego impedancję mechaniczną wyznaczyć można z zależności (13, 16 lub 19). Taki proces modelowania nazywa się homogenizacją.

4.1. Metoda objętościowa

W tej metodzie homogenizacji wartość (masy, modułu Younga itp.) modelu jednorodnego jest sumą ważoną wartości każdego „składnika” przegrody warstwowej. Wagami są objętości każdego składnika przegrody dwuwarstwowej. Ze względu na specyfikę obliczeń izolacyjności akustycznej w miejsce objętości wykorzystać można wysokości h każdej z warstw (w pracy zakłada się tę samą powierzchnię obu warstw przegrody).

$$\mu_z = \frac{\mu_1 \cdot h_1 + \mu_2 \cdot h_2}{h_1 + h_2} \quad (23)$$

gdzie: μ – masa jednostki powierzchni przegrody (w literaturze spotyka się również nazwę masa powierzchniowa),

indeksy 1 i 2 dotyczą odpowiednio pierwszej i drugiej warstwy przegrody dwuwarstwowej.

Zastępczy moduł sprężystości wyznacza się z tej samej zależności z tym, że w miejsce μ należy wstawić wartość modułu Younga E lub Kirchhoffa G .

Ten sposób wyznaczenia masy zastępczej wykorzystywana jest we wszystkich metodach homogenizacji opisanych w pracy. Wyniki obliczeń z wykorzystaniem tej metody homogenizacji opisano przez H1.

4.2. Metoda oparta na ugięciu statycznym

W tym przypadku homogenizacji moduł sprężystości wyznaczony został na podstawie porównania strzałki ugięcia dla elementu modelowanego jako belka Bernoulliego-Eulera. W tym celu autor zbudował przestrzenny model MES belki składającej się z dwóch materiałów. Strzałkę ugięcia wyznaczoną z modelu MES porównano ze strzałką ugięcia modelu belki liczoną ze wzoru:

$$y_{\max} = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI} \quad (24)$$

gdzie:

q – obciążenie ciągle belki (ciężar),

l – długość belki,

I – moment bezwładności przekroju belki,

E – poszukiwany moduł Younga.

W obu przypadkach modelowano belkę swobodnie podpartą obciążoną na całej długości jedynie ciężarem własnym. Dla modelu jednorodnego masę wyznaczono z metody objętościowej. Wyniki w oparciu o tak wyznaczone parametry opisano przez H2.

4.3. Metoda oparta na porównaniu pierwszej częstości drgań własnych

W tej metodzie homogenizacji moduł sprężystości wyznacza się w oparciu o porównanie pierwszej częstości drgań własnych wyznaczonych z modelu MES układu dwuwarstwowego i zależności analitycznych. W pracy wykorzystano model belki swobodnie podpartej (wyniki oznaczono H3), dla której częstość wyznacza się ze wzoru:

$$\omega = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (25)$$

gdzie:

A – pole przekroju belki, pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Przeanalizowano również płytę swobodnie podpartą, dla której częstość drgań własnych wyznacza się z zależności:

$$\omega = \pi^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (26)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

gdzie:

a, b, h – wymiary płyty,

pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Wyniki z wykorzystaniem tej metody homogenizacji oznaczono przez H4.

5. Wyniki obliczeń

W tym punkcie pracy przedstawiono wyniki analizy izolacyjności akustycznej dla przegród dwuwarstwowych. Wartości izolacyjności traktowane w pracy jako podstawowe, tzn. te, do których odnoszą się inne wyniki, autor otrzymał w wyniku analizy Elementów Skończonych. Analizowano model 3D przegrody, w której oba materiały połączone były we wszystkich punktach (węzłach siatki).

Wszystkie dane materiałowe zaczerpnięto z pracy [19].

W tab.1 zebrano wyniki obliczeń izolacyjności akustycznej dla przegrody dwuwarstwowej składającej się z płyty stalowej i gumowej (dla stali gęstość $\rho=7860 \text{ kg/m}^3$, moduł Younga $E=210 \text{ GPa}$, dla gumy $\rho=560 \text{ kg/m}^3$, $E=1 \text{ MPa}$). Modelowano warstwy o tej samej grubości $h=0.002 \text{ m}$.

W tab.1 pokazano błędy względne wyznaczone dla różnych modeli przegrody (wyniki w poszczególnych wierszach) i różnych metod homogenizacji (wyniki w kolumnach). Wszystkie wyniki wyznaczone są dla jednej częstotliwości wymuszenia, tab.1 $f=500 \text{ Hz}$, tab.2 dla $f=1000 \text{ Hz}$ i tab.3 $f=3000 \text{ Hz}$. Wszystkie wyniki odniesiono do wyników analizy 3D MES.

Tab.1 Błędy w analizie izolacyjności akustycznej przegrody dwuwarstwowej dla wymuszenia o częstotliwości $f=500 \text{ Hz}$

δ [%]	prawo masy	płyta cienka	płyta gruba
H1	6.34	5.43	5.54
H2	7.34	6.21	6.09
H3	5.12	4.55	4.51
H4	4.78	3.43	3.21

Tab.2 Błędy w analizie izolacyjności akustycznej przegrody dwuwarstwowej dla wymuszenia o częstotliwości $f=1000$ Hz

δ [%]	prawo masy	plyta cienka	plyta gruba
H1	4.03	3.98	3.24
H2	3.87	3.05	4.02
H3	3.09	2.67	3.54
H4	2.78	2.34	3.09

Tab.3 Błędy w analizie izolacyjności akustycznej przegrody dwuwarstwowej dla wymuszenia o częstotliwości $f=3000$ Hz

δ [%]	prawo masy	plyta cienka	plyta gruba
H1	5.61	5.09	4.33
H2	5.32	5.43	5.78
H3	4.62	3.97	3.56
H4	3.11	2.48	3.01

Z analizy wyników zamieszczonych w tab.1-3 wynika, że najmniejsze błędy otrzymano wykorzystując metodę homogenizacji opartą na porównaniu częstości drgań własnych wyznaczoną dla modelu przegrody w postaci płyty zginanej.

Podsumowanie

W pracy opisano podstawowy model teoretyczny izolacyjności akustycznej. W modelu tym przyjmuje się, że fala akustyczna pobudza do drgań przegrodę, która jest źródłem pola akustycznego „za” przegrodą. W analizowanym modelu pominięto wszystkie możliwe sprzężenia pomiędzy polem akustycznym i drganiami mechanicznymi. W tego typu modelu do wyznaczenia izolacyjności akustycznej wystarczające jest wyznaczenie impedancji mechanicznej przegrody.

W pracy jako model przegrody przyjęto płytę (bryłę) sztywną i dwa modele płyty odkształcalnej.

Ze względu na to, że przyjęte modele dotyczą przegród jednorodnych, analizowane w pracy przegrody warstwowe (dwuwarstwowe) poddane zostały metodom homogenizacji. W pracy opisano 4 różne metody homogenizacji. Wyniki analizy modeli po homogenizacji porównano z wynikami modelowania Metodą Elementów Skończonych (model 3D i warstwy panelu połączone we wszystkich punktach siatki).

Wyniki analizy zebrane w tab.1-3 wskazują na to, że praktycznie wszystkie opisane metody homogenizacji dają wyniki wystarczająco dokładne jak na zastosowania inżynierskie.

Bibliografia:

1. Bajdała P., The transmission loss calculation method of multilayer structures, Technical Transactions, Mechanics, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011, Zeszyt 3.
2. Bies D. A., Hansen C. H., Engineering noise control, theory and practice, 4th Ed., Spon Press, London and New York, 2009.
3. Brekke A., Calculation method for the transmission loss of single, double and triple partitions. Appl Acoust 1981;14.
4. Fahy F., Foundations of Engineering Acoustics. San Diego: Academic Press; 2003.
5. Jung J., Kook J., Goo S., Wang S. Sound transmission analysis of plate structures using the finite element method and elemen-

tary radiator approach with radiator error index, Advances in Engineering Software, Vol. 112, 2017.

6. Kurra S., Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements. Appl Acoust 2012;73(6-7).
7. Kurra S., Ardit D., Sound transmission loss of multilayered elements: comparison of calculated and measured results, Inter Noise 2000, The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Nice, France 2000.
8. Lee, Choong-Ryeol, Xu, Y., A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials, *Journal of Sound and Vibration* 326(1):290-301, 2009.
9. Majkut L., Zastosowanie radialnych funkcji bazowych do analizy pola akustycznego wewnątrz pojazdów, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2016 R. 17, nr 12.
10. Majkut L., Zastosowanie funkcji radialnych w analizie strukturalnej belki, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2017 R. 18, nr 12.
11. Majkut L., Olszewski R., Modelowanie izolacyjności akustycznej przegród jednorodnych, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2018 R. 19, nr 12.
12. Majkut L., Analiza teoretyczna zjawiska koincydencji i częstości krytycznych akustycznych paneli izolacyjnych, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2018 R. 19, nr 12.
13. Mansilla J., Masson F., Palma I. C. de, Pepino L., Bender L., Sound Insulation of Homogeneous Single Panels: a Comparison Between Real Construction Materials and Several Prediction Models. In: Proc. of 24th International Congress on Sound and Vibration, London; 2017.
14. Reynders E., Langley R., Dijkmans A., Vermeir G., A hybrid finite element - statistical energy analysis approach to robust sound transmission modeling, Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(19).

Theoretical calculation of transmission loss of two layers noise panels

In the paper basic theoretical models of transmission loss calculation are described. Four different methods of homogenisation used for building of the simplified panel model are described. Simplified model is the single homogeneous isotropic plate panel. For this panel three impedance values of one rigid and two flexible body models of panel are described and analysed. As flexible models the thin plate (Kirchhoff-Love plate model) i thick (Mindlin – Reissner model) are analysed. All results are compared to results of 3D FEM model.

Keywords: transmission loss, Kirchhoff-Love plate, Mindlin – Reissner plate, mechanical impedance, homogenisation.

Autorzy:

dr hab. inż. **Leszek Majkut** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, majkut@agh.edu.pl

**Praca powstała w ramach
Subwencji Badawczej nr 16.16.130.942**