

Część teoretyczna – IZOLACYJNOŚĆ AKUSTYCZNA PRZEGRÓD

Energia dźwięku padającego na przegrodę będzie częściowo odbita, częściowo pochłonięta, a ich stosunek będzie zależał od stosunku impedancji akustycznej materiału przegrody i powietrza. Część energii pochłoniętej będzie zamieniona na ciepło, a część będzie transmitowana do granicy przegrody i ośrodka znajdującego się po drugiej stronie. Na tej granicy znowu stosunek impedancji akustycznej materiału do impedancji ośrodka będzie decydował o tym jaka część energii przejdzie na drugą stronę przegrody.

Gdy fala akustyczna pada na przegrodę, część energii fali padającej (E_i) zostanie odbita (E_r), część pochłonięta (E_α) przez przegrodę i część przeniknie (E_t) na drugą stronę.

$$E_i = E_\alpha + E_r + E_t \quad (1)$$

Dzieląc obie strony równania przez E_i , otrzymujemy:

$$\frac{E_i}{E_i} = \frac{E_\alpha}{E_i} + \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t}{E_i} \quad (2)$$

$$1 = \alpha + \beta + \tau \quad (3)$$

gdzie: α - współczynnik pochłaniania dźwięku;

β - energetyczny współczynnik odbicia dźwięku;

τ - współczynnik przenikalności akustycznej przegrody.

Analogiczne zależności można wyprowadzić dla mocy (W) oraz natężenia (I) fal akustycznych.

$$W_i = W_\alpha + W_r + W_t \quad I_i = I_\alpha + I_r + I_t \quad (4)$$

Dzieląc obie strony równań przez (W_i) oraz (I_i), otrzymujemy:

$$\frac{W_i}{W_i} = \frac{W_\alpha}{W_i} + \frac{W_r}{W_i} + \frac{W_t}{W_i} \quad \frac{I_i}{I_i} = \frac{I_\alpha}{I_i} + \frac{I_r}{I_i} + \frac{I_t}{I_i} \quad (5)$$

$$1 = \alpha + \beta + \tau$$

$$1 = \alpha + \beta + \tau$$

gdzie: α - współczynnik pochłaniania dźwięku;

β - energetyczny współczynnik odbicia dźwięku;

τ - współczynnik przenikalności akustycznej przegrody.

Oscylacyjne zmiany ciśnienia padającej fali akustycznej wprawiają przegrodę w drgania. Drgająca przegroda, podobnie jak głośnik zaczyna emitować fale dźwiękowe.

Izolacyjność akustyczna właściwa przegrody to wielkość charakteryzująca odporność przegrody na przenikanie dźwięków. Słowo „właściwa” odnosi się do założenia, że dźwięk przenika na drugą stronę jedynie przez tę przegrodę.

Izolacyjność akustyczną przegrody wystawionej na działanie dźwięków powietrznych określa stosunek mocy akustycznej fal padających na przegrodę do mocy akustycznej, która jest przez tę przegrodę transmitowana.

$$R = 10 \log \frac{W_i}{W_t} = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

$$\tau = 10^{-0.1R} \quad (7)$$

gdzie: W_i - moc akustyczna fali padającej na przegrodę;

W_t - moc akustyczna fali transmitowanej przez przegrodę;

R - wskaźnik izolacyjności akustycznej, dB.

τ - współczynnik przenikalności akustycznej przegrody.

Izolacyjność akustyczna zależy od materiału, z którego zbudowana jest przegroda, częstotliwości i kąta padania dźwięku.

Izolacyjność akustyczna przegrody jednorodnej

Przegroda ma pewną sztywność i pewną masę, a zatem będzie wykazywała pewne właściwości rezonansowe.

Dla jednorodnej przegrody na charakterystyce wskaźnika izolacyjności akustycznej można wyróżnić kilka charakterystycznych zakresów, w których właściwości przegrody mają wpływ na izolacyjność dźwięku. Są to obszary, w których o R decyduje sztywność, rezonanse własne, masa i zjawisko koincydencji. Tłumienie wewnętrzne materiału wpływa na kształt krzywej w obszarach rezonansu i koincydencji.

PRAWO MASY

Prawo masy wyprowadzone na podstawie rozważań przenoszenia energii fal dźwiękowych padających pod różnymi kątami na cząsteczki przegrody, a następnie na cząsteczki powietrza po drugiej stronie wyraża się wzorem.

$$R = 20 \log(f M_p) - 47.5 \quad [dB] \quad (8)$$

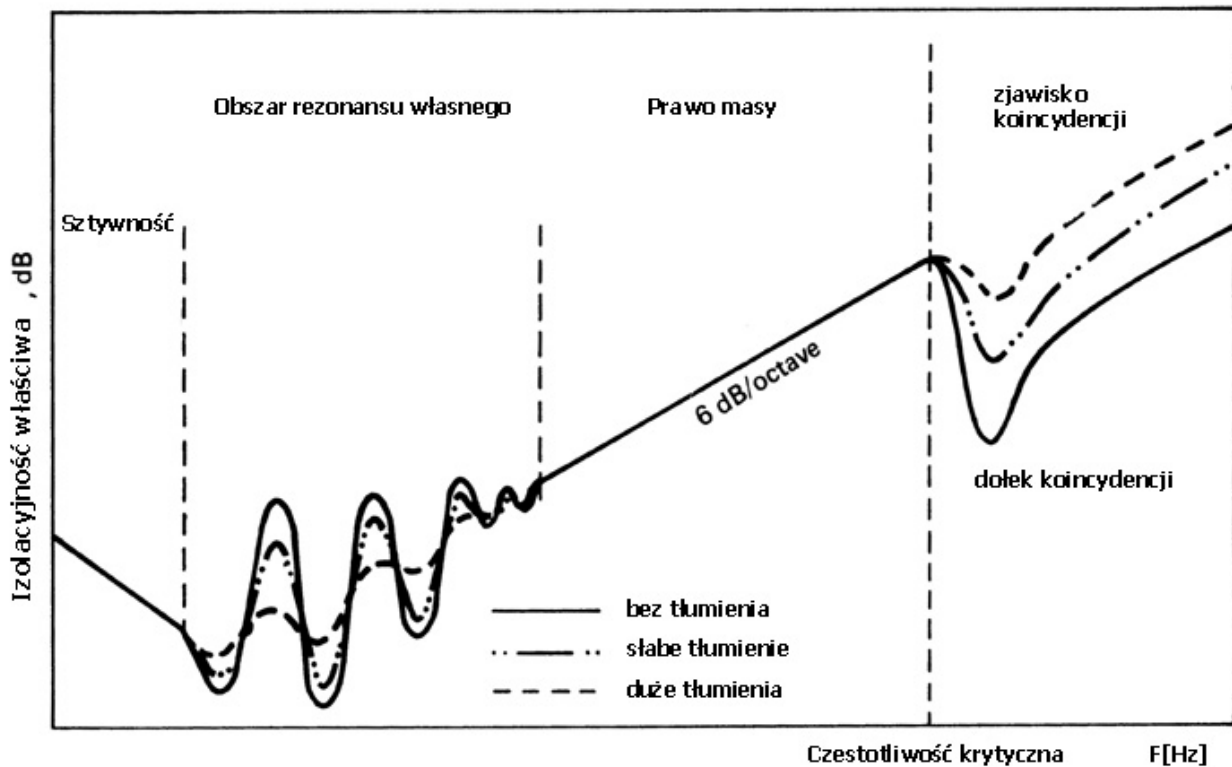
Gdzie: f - częstotliwość dźwięku padającego na przegrodę, [Hz];

M_p - masa powierzchniowa przegrody, [kg/m²].

$$R_1(M_{p1}, f) = 20 \log f + 20 \log M_{p1} - 47,5$$

$$R_2(M_{p2}, f) = 20 \log f + 20 \log M_{p2} - 47,5$$

$$R_2(M_{p2}, f) - R_1(M_{p1}, f) = 20 \log \left(\frac{M_{p2}}{M_{p1}} \right) \quad (9)$$



A zatem, przy podwojeniu masy powierzchniowej przegrody jej izolacyjność wzrasta o 6 dB.

$$R_1(M, f_1) = 20 \log f_1 + 20 \log M - 47,5$$

$$R_2(M, f_2) = 20 \log f_2 + 20 \log M - 47,5$$

$$R_2(M, f_2) - R_1(M, f_1) = 20 \log \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad (10)$$

Przy podwojeniu częstotliwości izolacyjność przegrody wzrasta o 6 dB.

$$\Delta R_{M,f} = 20 \log \left(\frac{M_{p2} f_2}{M_{p1} f_1} \right) \quad (11)$$

W obszarze, w którym obowiązuje prawo masy wskaźnik izolacyjności wzrasta o 6 dB przy podwojeniu częstotliwości dla określonej masy powierzchniowej przegrody, a także dla określonej częstotliwości wzrasta o 6 dB przy podwojeniu masy powierzchniowej (tzn. przy podwojeniu grubości przegrody).

W praktyce izolacyjność jest zawsze o kilka dB mniejsza od wartości teoretycznej wyznaczonej z prawa masy.

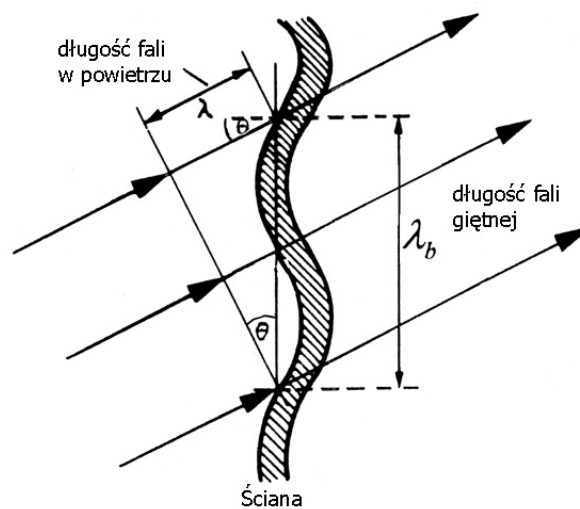
ZJAWISKO KOINCYDENCJI

W praktyce stosowanie prawa masy jest ograniczone w zakresie dużych częstotliwości przez zjawisko koincydencji. Zjawisko to występuje gdy długość składowej padającej fali akustycznej równoległa do przegrody pokrywa się z długością fal giętnych w przegrodzie. Dla pewnej częstotliwości i przy określonym kącie padania drgania giętne przegrody są wzmacniane i energia akustyczna będzie transmitowana przez tę przegrodę prawie bez tłumienia. Poniższa zależność jest warunkiem powstania zjawiska koincydencji.

$$\sin \Theta = \frac{\lambda}{\lambda_B}$$

λ - długość fal w powietrzu [m];

λ_B - długość fali giętnej w przegrodzie [m].



W praktyce fale padające dochodzą do przegrody pod różnymi kątami, która jest zatem „akustycznie przezroczysta” w pewnym zakresie częstotliwości zwanym „dołkiem koincydencji”.

Częstotliwość koincydencji

Ponieważ funkcja sinus ma największą wartość równą 1 dla kąta padania równego 90° , zatem maksymalna długość fali, przy której może wystąpić zjawisko koincydencji jest równa długości fali giętnej w tej przegrodzie.

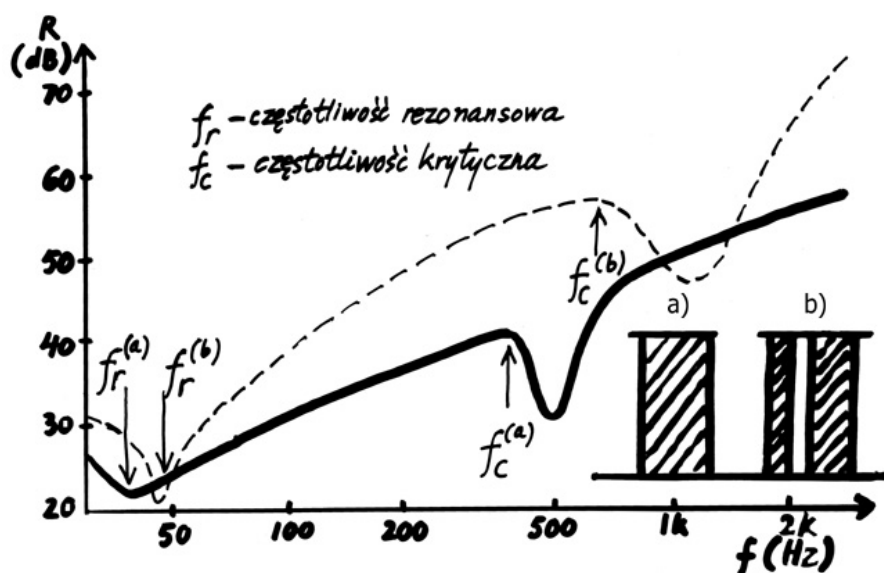
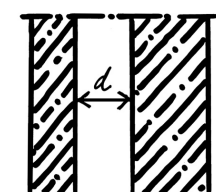
Najmniejsza częstotliwość, przy której występuje zjawisko koincydencji gdy fale padające ślizgają się po przegrodzie (tzn. gdy fale padające są równoległe do płaszczyzny przegrody). nazywana jest częstotliwością koincydencji f_c .

$$f_c = \frac{c^2}{1.8 h c_1}$$

$c = 340$ m/s; h – grubość przegrody w m; c_1 – prędkość fali podłużnej w przegrodzie [m/s];

Przegroda podwójna

Jedną z metod pozwalającą na przesunięcie wpływu koincydencji w zakres większych częstotliwości bez redukcji izolacyjności akustycznej jest stosowanie przegród podwójnych. W takim przypadku częstotliwość koincydencji zależy od grubości każdego z elementów, podczas gdy wskaźnik izolacyjności jest nawet większy niż wynikałoby to z prawa masy. Ponadto korzystny jest dobór dwóch przegród o różnych grubościach aby uniknąć nałożenia się efektu koincydencji w tym samym zakresie częstotliwości.



Rys. Porównanie charakterystyk izolacyjności akustycznej pojedynczej jednorodnej i przegrody podwójnej o takiej samej masie powierzchniowej

Częstotliwość rezonansowa - f_r

„Dołek” w zakresie małych częstotliwości (f_r) jest spowodowany mechanicznym rezonansem konstrukcji przegrody. Zazwyczaj zjawisko tego rezonansu nie ma wpływu na zakres częstotliwości mowy, ale w przypadku przegrody podwójnej przestrzeń między dwiema przegrodami działa jak sprężyna pomiędzy dwiema masami i wypadkowa częstotliwość rezonansowa jest większa niż dla przegrody pojedynczej o masie równej masie jednej z przegród. Należy dążyć do tego, aby częstotliwość rezonansowa była mniejsza od ok. 50 Hz.

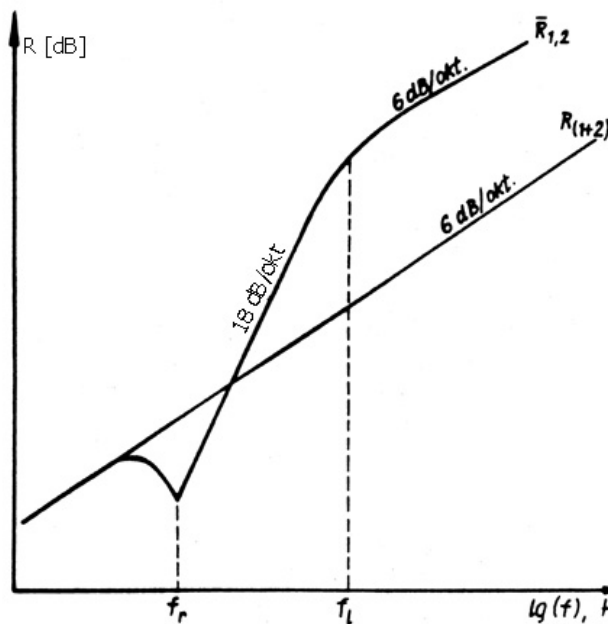
$$f_{r,b} = 590 \sqrt{\frac{M_{p1} + M_{p2}}{M_{p1} M_{p2}}} \frac{1}{d}$$

gdzie: M_{p1} i M_{p2} - masy powierzchniowe przegród [kg/m^2];
d - odstęp między przegrodami [cm].

Warto zauważyć, że efekt rezonansu można wykorzystać w przypadku, gdy w pomieszczeniu pożądane jest pochłanianie części energii akustycznej. Cienki panel jest wówczas umieszczany w określonej odległości od sztywnej ściany, a częstotliwość rezonansowa panelu jest dobierana tak, aby pokrywała się z zakresem częstotliwości, w którym pożądane jest największe tłumienie hałasu.

$$f_r = 590 \sqrt{\frac{1}{M_p d}}$$

gdzie: m - masa powierzchniowa płyty, $[\text{kg}/\text{m}^2]$;
 d - odstęp między płytą, a sztywną ścianą $[\text{cm}]$.



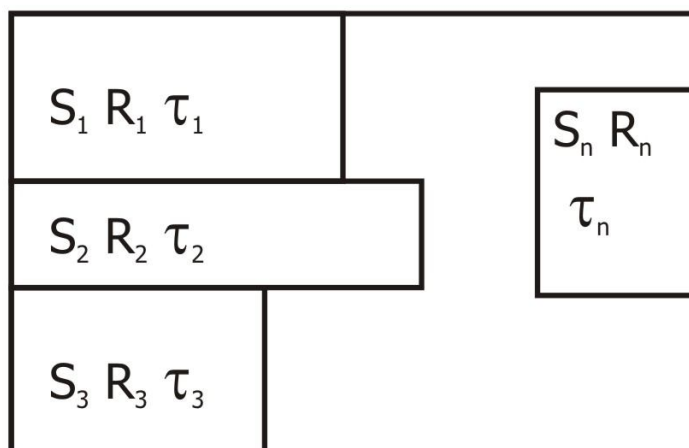
Rys. 27. Schematyczny przebieg charakterystyki izolacyjności akustycznej właściwej ścian podwójnych, bez połączeń (z pominięciem wpływu koincydencji ścianek składowych)

f_r - częstotliwość rezonansowa układu: masa - sztywność - masa, f_l - częstotliwość rezonansowa warstwy powietrza zamkniętego między ściankami składowymi, $R(1+2)$ - izolacyjność akustyczna jw. ściany pojedynczej o masie jednostkowej równej ścianie podwójnej, $\bar{R}(1,2)$ - izolacyjność akustyczna jw. ściany podwójnej

Rys. Porównanie charakterystyk izolacyjności akustycznej właściwej przegrody podwójnej i pojedynczej w zakresie „prawa Masy” przegrody pojedynczej.

$$f_l = \frac{c}{2\pi d} \quad d - \text{w [m]}$$

Przegroda niejednorodna powierzchniowo



Cała ściana podzielona jest na (n) jednorodnych elementów.

S_i – powierzchnia i –tego elementu ściany, R – izolacyjność akustyczna właściwa i-tego elementu ściany, τ_i - przenikalność akustyczna i-tego elementu,

Powierzchnia przegrody składającej się z (n) elementów o powierzchni (S_i), o różnej przenikalności akustycznej (τ_i), jest określona zależnością:

$$R_{wyp} = 10 \log \left(\frac{1}{\tau_{sr}} \right) \quad (17)$$

gdzie: τ_{sr} – średnia przenikalność akustyczna przegrody jest wyznaczana ze wzoru:

$$\tau_{sr} = \frac{S_1 \tau_1 + S_2 \tau_2 + \dots + S_n \tau_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (18)$$

Przypadek szczególny gdy powierzchnia przegrody składa się z (2) elementów o istotnie różniących się izolacyjnościami akustycznymi.

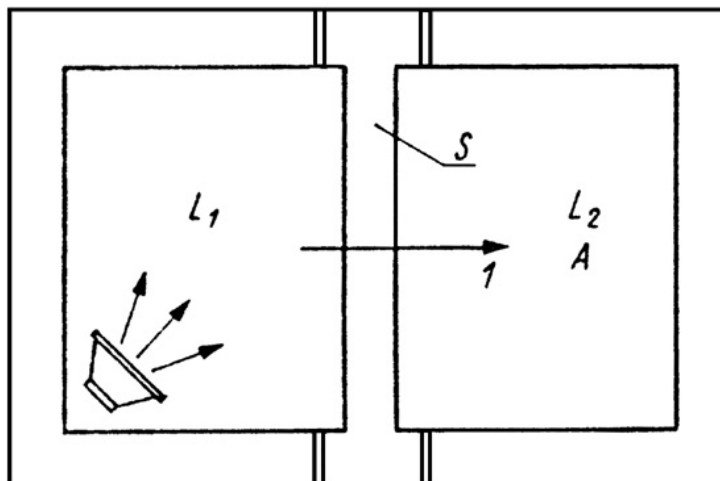
$$R_{wmax} - R_{wmin} \geq 10 \text{ dB:}$$

Przyjmujemy, że element o większej izolacyjności R_{wmax} ma powierzchnię S_{max} , natomiast element o mniejszej izolacyjności R_{wmin} ma powierzchnię S_{min} , przy czym S_{min} może być większe od S_{max} .

Wówczas wypadkową izolacyjność akustyczną takiej ściany można obliczyć z przybliżonej zależności:

$$R_{wyp} \cong R_{wmin} + 10 \log \left(\frac{S_{min} + S_{max}}{S_{min}} \right)$$

Izolacyjność przegrody między dwoma pomieszczeniami na dźwięki powietrzne



Gdy w obu pomieszczeniach pole akustyczne jest dyfuzyjne. wówczas izolacyjność akustyczna właściwa przegrody między tymi pomieszczeniami może być wyznaczona na podstawie zależności:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A_0}$$

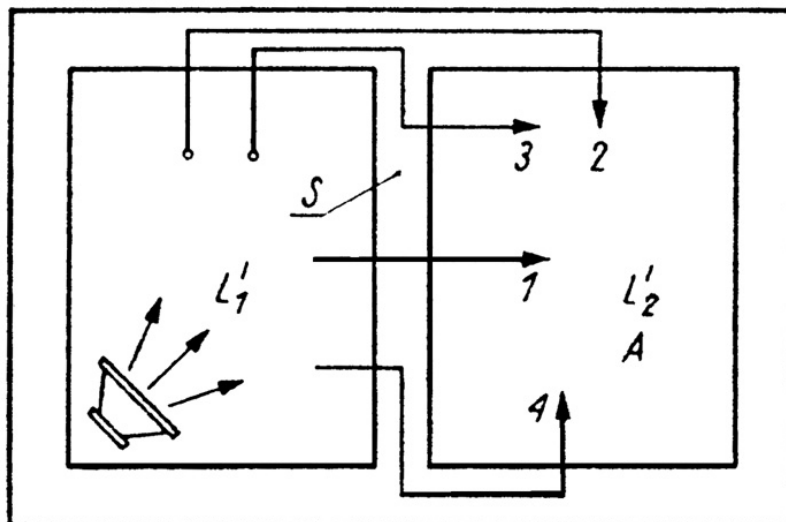
gdzie: L_1 – średni poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym ze źródłem dźwięku [dB];

L_2 – średni poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym, [dB];

S - pole powierzchni przegrody między tymi pomieszczeniami [m^2];

A_0 - chłonność akustyczna pomieszczenia odbiorczego [m^2].

Izolacyjność akustyczna właściwa przegrody między dwoma pomieszczeniami nadawczym i odbiorczym jest wyznaczana na podstawie różnicy poziomów ciśnień w pomieszczeniach po obu stronach przegrody powiększonej o współczynnik uwzględniający pochłanianie w pomieszczeniu odbiorczym. W warunkach laboratoryjnych współczynnik korekcyjny uwzględnia wielkość powierzchni mierzonej przegrody i chłonność akustyczną pomieszczenia odbiorczego, A_0 , którą można wyznaczyć na podstawie objętości i czasu pogłosu tego pomieszczenia.



Wskaźniki jednoliczbowe

Izolacyjność akustyczna przegrody bardzo często jest określana w postaci jednoliczbowego ważonego wskaźnika izolacyjności akustycznej R_w i związanych z nim widmowych wskaźników adaptacyjnych C i C_{tr} . Wielkości te są wyznaczane w oparciu o charakterystyki częstotliwościowe R . Wskaźniki widmowe zależą od widma hałasu oddziałującego na przegrodę.

Na podstawie R_w , C i C_{tr} wyznacza się wskaźniki oceny izolacyjności akustycznej właściwej R_{A1} i R_{A2} wg zależności:

$$R_{A1} = R_w + C$$

$$R_{A2} = R_w + C_{tr}$$

Wskaźnik R_{A1} stosuje się w przypadku oddziaływania na przegrodę hałasów bytowych, przemysłowych średnio i wysokoczęstotliwościowych, kolejowych i drogowych na trasach z dużymi prędkościami pojazdów oraz dla hałasu lotniczego w pobliżu lotnisk. Wskaźnik R_{A2} stosuje się w przypadku hałasu ruchu drogowego w mieście, hałasu lotniczego w dużych odległościach od lotnisk i dla hałasu przemysłowego niskoczęstotliwościowego.

Przy projektowaniu należy przyjmować projektowe wskaźniki oceny izolacyjności akustycznej właściwej R_{A1R} i R_{A2R} – są to zmniejszone o 2 dB wartości wskaźników laboratoryjnych.

$$R_{A1R} = R_{A1} - 2$$

$$R_{A2R} = R_{A2} - 2$$

W warunkach rzeczywistych istnieje wiele dróg przenoszenia dźwięku między pomieszczeniami. Można tu wyróżnić przenoszenie bezpośrednie i pośrednie.

Przenoszenie bezpośrednie – spowodowane jest tylko dźwiękiem padającym na element budowlany rozdzielający pomieszczenia i bezpośrednio z niego promieniowanym, a więc dźwięk jest przenoszony tylko drogą materiałową przez ten element, oraz gdy dźwięk przenoszony jest drogą powietrzną przez niektóre części elementu takie jak przepusty żaluzje, szczeliny itp.

Przenoszenie pośrednie dźwięku z pomieszczenia nadawczego do odbiorczego odbywa się innymi drogami niż bezpośrednie. Może odbywać się drogą powietrzną (np. kanałami wentylacyjnymi, sufitami podwieszonymi, korytarzami) lub materiałową. Przenoszenie drogą materiałową nazywa się przenoszeniem bocznym – głównie przez ściany, stropy i sufity.

Ze względu na boczne przenoszenie dźwięku występujące w budynku określa się przybliżoną izolacyjność akustyczną właściwą ścian wewnętrznych (R'_w), która jest mniejsza od izolacyjności określonej w warunkach laboratoryjnych (R_w). Wskaźnik przybliżonej izolacyjności akustycznej R'_w oraz

wskaźniki przybliżone oceny izolacyjności akustycznej R'_{A1} i R'_{A2} , przegrody rozdzielającej dwa pomieszczenia w budynku należy obliczać ze wzorów:

$$R'_w = R_w - K_a$$

$$R'_{A1} = R_{A1} - K_a$$

$$R'_{A2} = R_{A2} - K_a$$

Wartości projektowe tych wskaźników wg zależności:

$$R'_{A1R} = R_{A1R} - K_a = R_{A1} - 2 - K_a$$

$$R'_{A2R} = R_{A2R} - K_a = R_{A2} - 2 - K_a$$

Wartość przenoszenia bocznego K_a może przyjmować wartości od jednego do dwudziestu kilku decybeli w zależności od zastosowanych przegród i rozwiązań konstrukcyjnych. Zatem izolacyjność akustyczna ścian w budynku zależy zarówno od izolacyjności akustycznej przegrody rozdzielającej pomieszczenia jak również od izolacyjności akustycznej przegród bocznych. Mogą zaistnieć przypadki, w których izolacyjność akustyczna będzie zdeterminowana nie izolacyjnością ściany działowej, a izolacyjnością konkretnej drogi bocznej.