MECHANIKA		3-M/2011
CZASOPISMO TECHNICZNE	WYDAWNICTWO	ZESZYT 5
TECHNICAL TRANSACTIONS	POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ	USSUE 5
MECHANICS		YEAR 108

PAWEŁ BAJDAŁA*

METODY OBLICZANIA IZOLACYJNOŚCI AKUSTYCZNEJ STRUKTUR WIELOWARSTWOWYCH

THE TRANSMISSION LOSS CALCULATION METHOD OF MULTILAYER STRUCTURES

Streszczenie

Istotnym elementem wpływającym na warunki pracy operatora maszyny roboczej jest rozkład pola akustycznego w kabinie. Decydujący wpływ będzie miała struktura ścian kabiny. W niniejszej pracy zajęto się problematyką określania izolacyjności akustycznej takich struktur. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z algorytmem zaczerpniętym z literatury.

Słowa kluczowe: maszyna robocza, kabina operatorska, struktura wielowarstwowa, predykcja izolacyjności akustycznej, izolacyjność akustyczna

Abstract

A significant element which has influence on the workplace conditions comfort of the heavy duty machine operator is sound field distribution in the cabin. The wall cab structure has a crucial impact. This paper addresses the problem of determining the transmission loss of such structures. The calculation was provided according to algorithms from literature sources.

Keywords: heavy duty machine, operator's cabin, multilayer structure, acoustic insulation prediction, transmission loss

Mgr inż. Paweł Bajdała, Instytut Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Hałas jest jednym z decydujących czynników mających wpływ na komfort pracy operatora maszyn roboczych ciężkich. Jedną z metod ochrony operatora przed szkodliwym działaniem hałasu jest stosowanie kabin dźwiękoizolacyjnych. Właściwości dźwiękoizolacyjne kabiny zależą przede wszystkim od struktury ścian kabiny i zastosowanych materiałów.



Rys. 1. Przykładowa struktura kabiny operatorskiej

Fig. 1. The Example of the operator's cab structure

2. Kabiny dźwiękoizolacyjne

2.1. Czynniki materiałowe i konstrukcyjne wpływające na rozkład pola akustycznego w kabinie operatorskiej

Zjawisko przenikania energii akustycznej przez przegrodę jest skomplikowane i bardzo złożone. Dźwięk przenika przez przegrodę przede wszystkim wskutek drgań przegrody jako całości. Jest to zjawisko dynamiczne, dlatego na wartości i przebieg charakterystyki izolacyjności akustycznej przegrody będą miały wpływ wszystkie te cechy materiału, które mają wpływ tak na pobudzanie przegrody do drgań, jak i na przenikalność dźwięku przez strukturę. Istotny wpływ ma także przenikanie dźwięku przez wszelkie nieszczelności konstrukcji kabiny. Mając powyższe na uwadze można wyróżnić dwa rodzaje czynników wpływających na izolacyjność akustyczną przegrody: czynniki materiałowe i czynniki konstrukcyjne.

Do czynników materiałowych należą:

- gęstość,
- sprężystość,
- tłumienie wewnętrzne w materiale,
- porowatość,
- sztywność dynamiczna warstwy materiału.
- Do czynników konstrukcyjnych należy zaliczyć:
- akustyczną niejednorodność przegrody, ze szczególnym uwzględnieniem następujących rozwiązań konstrukcyjnych:
 - wykonania w przegrodzie komór powietrznych lub komór z wypełnieniem materiałowym o odpowiednich własnościach akustycznych,
 - pokrycia zewnętrznych powierzchni przegrody niejednorodnej warstwą uszczelniającą,
 - wykonania przegrody złożonej z kilku warstw materiałów o różnych własnościach akustycznych,

- wykonania przegrody z płyt zamocowanych do szkieletu,
- zastosowania dodatkowego układu rezonansowego na przegrodzie,
- wykonania przegrody jako wielokrotnej;
- rodzaj zamocowania przegrody na jej obwodzie do pozostałej konstrukcji, przy czym szczególnie wyróżnia się zamocowanie sztywne i zamocowanie elastyczne (za pomocą uszczelek wykonanych z materiału sprężystego),
- szczelność przegrody, a w szczególności: pęknięcia na powierzchni przegrody, punktowe nieszczelności i uszczelnienie przegrody na jej obwodzie.

Problematyką sterowania rozkładem pól czynników szkodliwych w kabinie operatora maszyny zajęto się w [3]. Autorzy pracy wyselekcjonowali te parametry kabiny (w tym materiałowe), które wpływać będą na klimat akustyczny w kabinie.

2.2. Materiały i struktury wielowarstwowe ścian kabin operatorskich

Ścianka kabiny operatorskiej powinna charakteryzować się odpowiednimi parametrami: akustycznym i technicznym. Decydującym parametrem z akustycznego punktu widzenia jest wysoka izolacyjność akustyczna, natomiast z technicznego grubość ścianki kabiny, która powinna być ograniczona do minimum. Ponadto współczesne konstrukcje inżynierskie kładą szczególny nacisk na trwałość. Łatwo więc zauważyć, że pogodzenie wymienionych wcześniej parametrów konstrukcyjnych podczas projektowania kabiny może okazać się trudne. Aby sprostać tym problemom, stosuje się wyszukane połączenia specjalnych materiałów i struktur ścian.

Przegrody dźwiękoizolacyjne ze względu na konstrukcję dziela się na: pojedyncze (jednorodne, niejednorodne i warstwowe) oraz wielokrotne złożone z przegród pojedynczych i ich kombinacji, oddzielonych szczelinami powietrznymi. Poszczególne przegrody mogą zawierać dodatkowe układy izolacyjne, takie jak: układy rezonansowe z dodatkową warstwą materiału sprężystego lub połączeniami sprężystymi, czy też układy szkieletowe.

Najczęściej stosowaną strukturą ścian kabin operatorskich są struktury dwuścienne z rdzeniami dźwiękochłonnymi. Warstwy zewnętrzne wykonane są zazwyczaj z materiałów sztywnych takich jak stal lub aluminium, natomiast rdzeń przegrody wykonuje się z materiałów dźwiękochłonnych. Materiały stosowana na rdzeń ze względu na strukturę i cechy materiałowe, dzielą się na: porowate, włókniste, ziarniste oraz o strukturze "plastra miodu".

Szerzej o materiałach i strukturach przegród dźwiękoizolacyjnych, jak również wynikach badań izolacyjności akustycznej przegród dwuściennych z rdzeniami dźwiękochłonnymi napisano w [1].

3. Pojęcie izolacyjności akustycznej i metody określania izolacyjności akustycznej przegrody

3.1. Pojęcie izolacyjności akustycznej

Izolacyjność akustyczna od dźwięków powietrznych:

Jednostka niezależną od powierzchni przegrody i miarą izolacyjności przegrody od dźwięków powietrznych jest izolacyjność akustyczna właściwa R_i . Izolacyjność akustyczną właściwa przegrody definiuje się jako stosunek całkowitej energii fali akustycznej 6

padającej na przegrodę do całkowitej energii akustycznej przenikającej przez przegrodę i wyraża się wzorem

$$R_{i} = 10\log\frac{E_{1}}{E_{2}} = 10\log\frac{1}{\tau} [dB]$$
(1)

gdzie:

- E_1 całkowita energia fali akustycznej padającej na przegrodę,
- E_2 całkowita energia akustyczna przenikająca przez przegrodę,
- τ współczynnik przenikalności.

Jeżeli przegroda rozdziela dwa pomieszczenia, w których pola akustyczne można uznać za rozproszone i jeżeli energia akustyczna przenika z jednego pomieszczenia do drugiego wyłącznie za pośrednictwem tej przegrody, izolacyjność akustyczna właściwa R_i przegrody wyraża się w postaci różnicy poziomów ciśnień akustycznych istniejących po obu stronach przegrody, zgodnie ze wzorem

$$R_{i} = L_{1} - L_{2} + 10\log\frac{S}{A}[dB]$$
⁽²⁾

gdzie:

- L₁ średni poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym ze źródłem dźwięku, [dB],
- L_2 średni poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczaniu po przeciwnej stronie przegrody, [dB],
- S całkowita powierzchnia przegrody, $[m^2]$,
- A chłonność akustyczna pomieszczenia odbiorczego, $[m^2]$.

3.2. Prawo masy

Według prawa masy izolacyjność akustyczna pojedynczej przegrody jednorodnej zależy od masy przegrody przypadającej na jednostkę powierzchni (gęstości powierzchniowej) i częstotliwości fali dźwiękowej i powinna w przybliżeniu wzrastać o 6 dB/oktawę.

Jedną z postaci prawa masy można napisać w postaci

$$R_{r} = 20 \log \left(h \cdot \rho \frac{\varpi}{2\rho_{0}c_{0}} \right) - 5 \left[dB \right]$$
(3)

gdzie:

- h grubość warstwy materiału, [m],
- ρ gęstość materiału struktury, [kg/m³],
- ϖ częstość drgań wymuszających, [rad/s],
- ρ_0 gęstość powietrza, [kg/m³],
- c_0 prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu, [m/s].

Badania różnych autorów wykazały znaczne rozbieżności pomiędzy obliczonymi wynikami, a wynikami badań eksperymentalnych. Przegrody o takim samym ciężarze na jednostkę powierzchni, wykonane z materiałów o niejednakowych własnościach fizycznych



różnią się miedzy sobą zarówno wartością średniej izolacyjności akustycznej, jak również przebiegiem charakterystyk izolacyjności akustycznej właściwej. Powodem tych niezgodności jest zjawisko koincydencji, które zachodzi po przekroczeniu częstotliwości granicznej, zwanej częstotliwością koincydencji.

Częstotliwość koincydencji, czyli częstotliwość, powyżej której w ścianach obudowy powstaje fala giętna, powodująca intensywniejsze przekazywanie energii akustycznej można wyznaczyć z zależności

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \left[Hz \right] \tag{4}$$

gdzie:

M - masa powierzchniowa, [kg/m²],

B – sztywność płyty na zginanie, [N·m].

3.3. Izolacyjność akustyczna wg Sharpa

W [2] przedstawiono metodę wyznaczania izolacyjności akustycznej struktur wielowarstwowych. Schemat analizowanej struktury pokazano na rysunku 2. Poniżej przedstawiono wzory pozwalające na określenie izolacyjności akustycznej przegrody wielowarstwowej.

Impedancję akustyczną $Z_{B1,2,3}$ i $Z_{E1,2,3}$ dla poszczególnych warstw struktury wyznacza się z zależności

$$Z_{B1,2,3} = \frac{i8\rho_{1,2,3}c_{s1,2,3}^{4}}{\varpi^{3}} \left\{ \beta_{1,2,3}k_{x}^{2} \tanh\left(\frac{\beta_{1,2,3}h_{1,2,3}}{2}\right) - \left(k_{x}^{2} - \frac{\varpi^{2}}{2c_{s1,2,3}^{2}}\right)^{2} \frac{\tanh\left(\frac{\alpha_{1,2,3}h_{1,2,3}}{2}\right)}{\alpha_{1,2,3}} \right\}$$
(5)

$$Z_{E1,2,3} = \frac{i\rho_{1,2,3}c_{s1,2,3}^4}{\varpi^3} \left\{ -\beta_{1,2,3}k_x^2 \operatorname{coth}\left(\frac{\beta_{1,2,3}h_{1,2,3}}{2}\right) + \left(k_x^2 - \frac{\varpi^2}{2c_{s1,2,3}^2}\right)^2 \frac{\operatorname{coth}\left(\frac{\alpha_{1,2,3}h_{1,2,3}}{2}\right)}{\alpha_{1,2,3}} \right\}$$
(6)

gdzie:

$$\alpha_{1,2,3}^2 = k_x^2 - \frac{\overline{\omega}^2}{c_{c1,2,3}^2}$$
(7)

$$\beta_{1,2,3}^2 = k_x^2 - \frac{\overline{\varpi}^2}{c_{s_{1,2,3}}^2}$$
(8)

 k_x, k_y – liczba falowa odpowiednio dla kierunku *x* i *y*, [m⁻¹], $c_{s1,2,3}, c_{c1,2,3}$ – prędkość w materiałach struktury odpowiednio dla fali poprzecznej i podłużnej, [m/s], 8

 $p_{1,2,3} \\ d_1, d_2$

 odległość pomiędzy materiałem zewnętrznym, a rdzeniem struktury ściany, [m].



Fig. 2. The calculation scheme

Współczynniki odbicia i przewodzenia fali płaskiej poszczególnych elementów struktury można określić przy pomocy wzorów

$$R_{1,2,3} = -C_{1,2,3} \left(1 + Z_{B1,2,3} Z_{E1,2,3} \frac{\cos^2 \theta}{4\rho_0^2 c_0^2} \right)$$
(9)

$$T_{1,2,3} = -C_{1,2,3} \left(Z_{B1,2,3} + Z_{E1,2,3} \right) \frac{\cos \theta}{2\rho_0 c_0}$$
(10)

gdzie:

$$C_{1,2,3} = \frac{1}{\left[1 + Z_{B1,2,3} \frac{\cos\theta}{2\rho_0 c_0}\right] \left[1 - Z_{E1,2,3} \frac{\cos\theta}{2\rho_0 c_0}\right]}$$
(11)

 θ – kąt padania fali na powierzchnię przegrody, [°].

Obliczenie sumarycznego wskaźnika *T* dla przegrody trójwarstwowej można określić ze wzoru (12)

$$T = \frac{-T_{1}T_{3}\exp\left(-ik_{y}\overline{d_{1}+d_{2}}\right)}{R_{1}R_{3}\left\{T_{2}-\frac{1}{T_{2}}\left[\exp\left(-2ik_{y}d_{2}\right)/R_{3}-R_{2}\right]\left[\exp\left(-2ik_{y}d_{1}\right)/R_{1}-R_{2}\right]\right\}}$$
(12)

Uśredniony współczynnik przenikalności w polu rozproszonym wyznacza się z zależności (13)

$$\langle T^2 \rangle = \frac{\int_{0}^{\theta_{\rm lim}} |T|^2 \sin 2\theta d\theta}{\int_{0}^{\theta_{\rm lim}} \sin 2\theta d\theta}$$
(13)

5

Ostatecznie izolacyjność akustyczną TL można określić jako

$$TL = -10\log_{10}(\langle T^2 \rangle) \tag{14}$$

4. Obliczenie izolacyjności akustycznej przykładowej struktury ściany kabiny

Obliczenia przeprowadzono dla struktury pokazanej na rysunku 3. Składa się ona z trzech warstw: dwóch warstw aluminium o różnej grubości oraz warstwy gumy porowatej.



Rys. 3. Przekrój analizowanej struktury

Fig. 3. The cross section of analyzing structure

4.1. Dane przyjęte do obliczeń

Obliczenie przeprowadzono dla poniższych danych materiałowych, zaczerpniętymi z [2, 5, 9].

Aluminium:	Guma porowata:
$\sigma_1 = 0,33$	$\sigma_2 = 0,38$
$\rho_1 = 4200 \text{ kg/m}^3$	$\rho_2 = 400 \text{ kg/m}^3$
$E_1 = 7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$	$E_2 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$

gdzie:

 $\sigma_{1,2}$ – współczynnik Poissona odpowiednio aluminium i gumy porowatej,

 $\rho_{1,2}$ – gęstość odpowiednio aluminium i gumy porowatej, [kg/m³],

 $E_{1,2}$ – moduł Younga odpowiednio aluminium i gumy porowatej, [N/m²].

4.2. Wyniki obliczeń

Izolacyjność akustyczna obliczona wg prawa masy i algorytmu Sharpa, została przedstawiona na rysunku 4. Ponadto dla dodatkowej weryfikacji na rysunku 5 porównano wyniki uzyskane wg algorytmu Sharpa analizowanej przegrody z wynikami pomiarowymi publikowanymi w [5].



Rys. 4. Wykres izolacyjności akustycznej przegrody: I – obliczonej wg prawa masy, II – obliczonej wg algorytmu Sharpa

Fig. 4. The Plot of transmission loss of barrier: I – calculated by mass law, II – calculated by Sharp algorithm



Rys. 5. Wykres zmian izolacyjności akustycznej przegrody dla pasm tercjowych: I – obliczonej wg algorytmu Sharpa, II – zmierzonej [5]



10

5. Wnioski

Wyniki obliczeń izolacyjności akustycznej uzyskane wg prawa masy i algorytmu Sharpa wykazały znaczne różnice.

Prawo masy pozwala w sposób bardzo szybki i prosty określić izolacyjność akustyczną przegrody. Ponieważ nie uwzględnia ono zarówno struktury przegrody, jak również właściwości materiałów, prawo masy pozwala jedynie w przybliżeniu określić izolacyjność akustyczną.

Metodą bardziej złożoną, lecz pozwalającą uzyskać znacznie dokładniejsze informacje o własnościach akustycznych struktury jest algorytm Sharpa. Na rysunku 4. zaobserwowano znaczne spadki izolacyjności akustycznej w niektórych obszarach. Spadki te mogą być wywołane zjawiskiem koincydencji. Charakter przebiegu izolacyjności akustycznej uzyskanego wg Sharpa, jest zbliżony do wartości izolacyjności uzyskanej z pomiaru [5].

Różnice pomiędzy wynikami izolacyjności akustycznej uzyskanymi wg algorytmu Sharpa i wynikami pomiarów mogą być spowodowane wieloma czynnikami. Odrębność własności materiałowych w stosunku do właściwości materiałów zastosowanych w badaniach oraz warunki w jakich przeprowadzane były pomiary, a których algorytm obliczeniowy nie uwzględnia, mogą być tylko niektórymi z przyczyn.

Literatura

- [1] Engel Z., Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, PWN, Warszawa 2001.
- [2] Łazarkiewicz S., Szymański H. i in., Mały poradnik mechanika, WNT, Warszawa 1970.
- [3] Michałowski S., Stolarski B., Dziechciowski Z., Zależność parametrów charakteryzujących pole wibroakustyczne i cieplne w kabinie operatora maszyny roboczej od jej konstrukcji, Czasopismo Techniczne, z. 1-M/2006, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [4] Puzyna Cz., Ochrona środowiska pracy przed hałasem, WNT, Warszawa 1981.
- [5] S a d o w s k i J., Akustyka architektoniczna, PWN, Warszawa–Poznań 1976.
- [6] Sadowski J., Podstawy izolacyjności akustycznej ustrojów, PWN, Warszawa 1973.
- [7] Sharp B.H.S., Beauchamp J.W., Freeman G.E., *The Transmission Loss of Multilayer Structures*, Journal of Sound and Vibration (1969) 9(1), 383-392.
- [8] Sikora J., Turkiewicz J., Badania izolacyjności akustycznej przegród dwuściennych z rdzeniami dźwiękochłonnymi z materiałów ziarnistych, Czasopismo Techniczne, z. 1-M/2007, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- [9] Praca zbiorowa, Guma Poradnik inżyniera i technika, WNT, Warszawa 1973.