

ZYGMUNT DZIECHCIOWSKI*

CHARAKTERYSTYKI WIBROAKUSTYCZNE I TERMICZNE WYBRANYCH MATERIAŁÓW POSZYCIA ŚCIAN KABIN

VIBROACOUSTIC AND THERMAL CHARACTERISTICS SELECTED PLATE COMPONENTS OF OPERATOR'S CABIN WALLS

Streszczenie

W artykule przedstawiono teoretyczną analizę właściwości materiałów znajdujących zastosowanie w budowie kabin maszyn roboczych, która może pozwolić na odpowiedni dobór materiałów poszycia w aspekcie łącznej oceny komfortu wibroakustycznego i termicznego na stanowisku pracy operatora maszyny.

Słowa kluczowe: kabina maszyny roboczej, komfort na stanowisku pracy, izolacja wibroakustyczna i termiczna

Abstract

This paper presents the theoretical analysis of materials properties use in cabins structure of heavy duty machines which allow to select suitable plate components of cabin walls in aspect of combined assessment of vibroacoustic and thermal comfort in the workplace of the machine operator.

Keywords: heavy duty machine, workpace comfort, vibroacoustic and thermal insulations

* Dr inż. Zygmunt Dziechciowski, Instytut Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Ergonomiczne projektowanie kabin maszyn roboczych powinno uwzględniać wpływ wielu czynników szkodliwych oddziałujących na operatora maszyny, m.in. takich jak: hałas, drgania, zapylenie, klimat cieplny itp. Sterowanie rozkładem pól szkodliwych czynników może być dokonywane za pośrednictwem zmiany konstrukcji kabiny. W pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu grubości materiałów stosowanych jako elementy poszycia na warunki termiczne i wibroakustyczne w kabinie.

2. Wpływ grubości elementu poszycia na charakter pól akustycznego, drganiowego i cieplnego w kabinie operatora

Analizując konstrukcje kabiny maszyny roboczej w aspekcie izolacji akustycznej, drganiowej i termicznej, można jej budowę sprowadzić do układu składającego się z szeregu płyt o różnych cechach konstrukcyjnych. Do opisu zjawisk kształtujących pola wibroakustyczne i termiczne można wykorzystać: równanie izolacyjności akustycznej właściwej dla płyty, równanie drgań płyty oraz równanie wymiany ciepła w układzie płytowym [2, 3]. Jest to podejście najprostsze, ograniczone jednak zakresem stosowalności wykorzystywanych w obliczeniach wzorów, niemniej jednak przy wstępnym doborze materiałów proste i bardzo wygodne.

Możliwości sterowania właściwościami pól wibroakustycznego i cieplnego w kabinie przez zmianę właściwości elementów poszycia zastosowanych do ich budowy przedstawiono w [2]. Wykazano, że do zmian właściwości pola można wykorzystać: zmianę izolacyjności akustycznej ścianki, zmianę częstości drgań własnych i zmianę współczynnika przenikania ciepła elementu poszycia. W niniejszym artykule dokonano próby wzajemnego skojarzenia tych właściwości konstrukcji.

Obliczenia obejmowały określenie zmian izolacyjności akustycznej właściwej R_w , izolacyjności termicznej (zmiany współczynnika przenikania ciepła k) oraz wartości częstości drgań własnych przegrody wraz ze zmianą grubości wybranego elementu poszycia. Przeprowadzono je przy pewnych założeniach upraszczających, a mianowicie:

- ograniczono się do pierwszej formy drgań,
- obliczenia izolacyjności akustycznej właściwej wykonano dla wymuszenia harmonicznego o częstotliwości 1 kHz,
- strumień ciepła pada prostopadle do powierzchni elementu poszycia,
- fala akustyczna pada prostopadle do powierzchni elementu poszycia,
- wartości współczynników wnikania ciepła α po obu stronach przegrody są różne i wynoszą: $\alpha_1 = 22,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $\alpha_2 = 7,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; wartości te przyjęto za [4] i odnoszą się one odpowiednio do warstwy zewnętrznej i wewnętrznej przegrody.

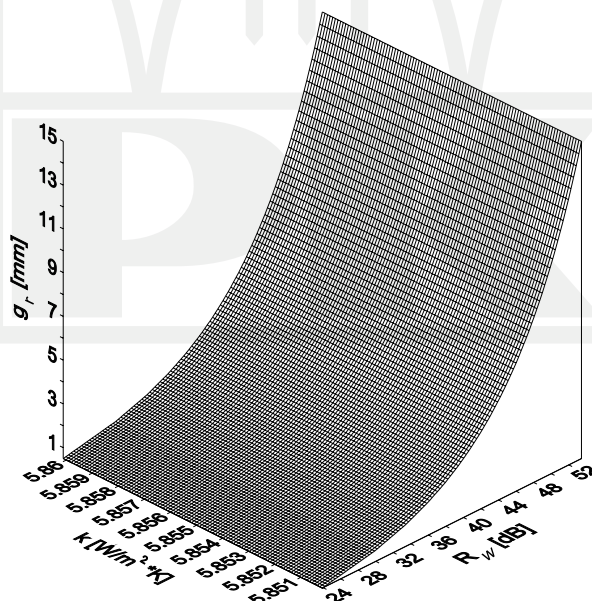
Wykaz wybranych materiałów oraz ich właściwości fizycznych, wykorzystanych w obliczeniach, przedstawiono w tabeli 1.

Właściwości fizyczne materiałów wykorzystanych w obliczeniach

Lp.	Materiał	Gęstość ρ [kg/m ³]	Moduł Younga E [MPa]	Liczba Poissona ν	Prędkość dźwięku c [m/s]	Współczynnik przew. ciepła λ [W/m K]
1	Asfalt (lany)	2000	7700,0	0,40	2500	0,75
2	Guma twarda	1200	8,0	0,35	82	0,2
3	PCW (linoleum)	1600	200,0	0,35	1200	0,2
4	Stal	7800	$2,1 \times 10^5$	0,33	5200	50
5	Szkło krzemowe	2500	$0,67 \times 10^5$	0,22	5200	0,8
6	Wełna mineralna	150	42,0	0,2	ok. 0	0,042

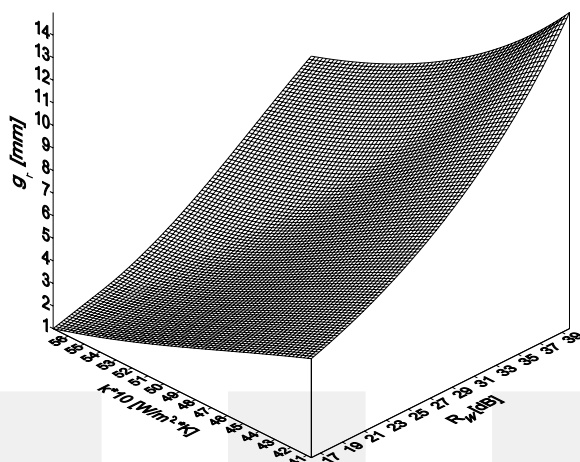
2.1. Analiza zależności izolacyjności akustycznej R_w i współczynnika przenikania ciepła k dla jednowarstwowego elementu poszycia kabiny

Przykładowe wyniki obliczeń, w postaci wykresów zmian izolacyjności akustycznej R_w oraz współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości elementu poszycia pokazano na rys. 1 i 2. Obliczenia wykonano dla materiałów, których właściwości zamieszczono w tabeli 1.



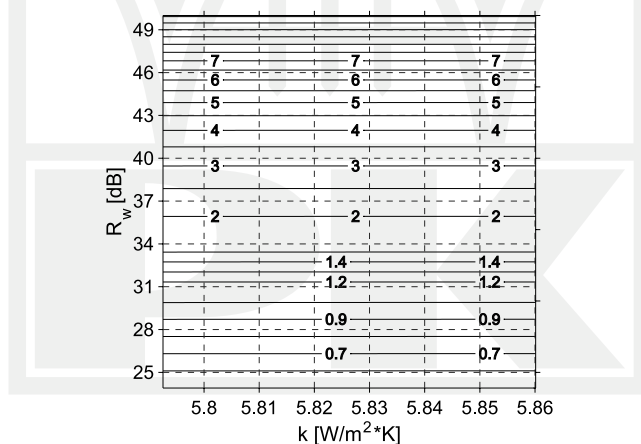
Rys. 1. Zmiana izolacyjności akustycznej R_w i współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości g_r dla stali

Fig. 1. Changing the acoustic insulation R_w and heat transfer coefficient k with the change of thickness g_r for steel



Rys. 2. Zmiana izolacyjności akustycznej R_w i współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości g_r dla PCW

Fig. 2. Changing the acoustic insulation R_w and heat transfer coefficient k with the change of thickness g_r for PCW

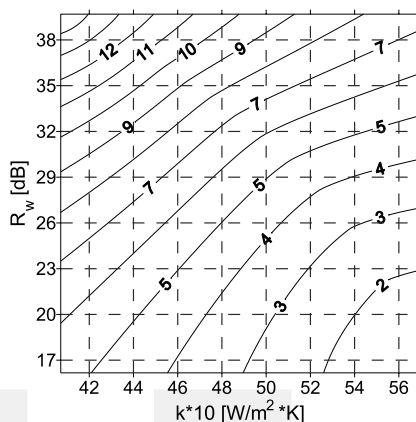


Rys. 3. Zmiana izolacyjności akustycznej R_w i współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości g_r (linie stałej grubości płyty) dla stali

Fig. 3. Changing the acoustic insulation R_w and heat transfer coefficient k with the change of thickness g_r (lines of constant thickness of plate) for steel

Z analizy wykresów prezentowanych na rys. 1–4 wynika, że mamy tu do czynienia z dwoma typami elementów poszycia. Pierwszy z nich nie jest wrażliwy na warunki termiczne, a ze wzrostem grubości zmienia się tylko izolacyjność akustyczna. Drugi typ materiałów wykazuje wrażliwość zarówno na właściwości akustyczne, jak i termiczne.

Prezentowane na rys. 1 i 2 wykresy przedstawiono również w innej postaci jako linie stałych grubości materiałów przegrody (rys. 3 i 4).

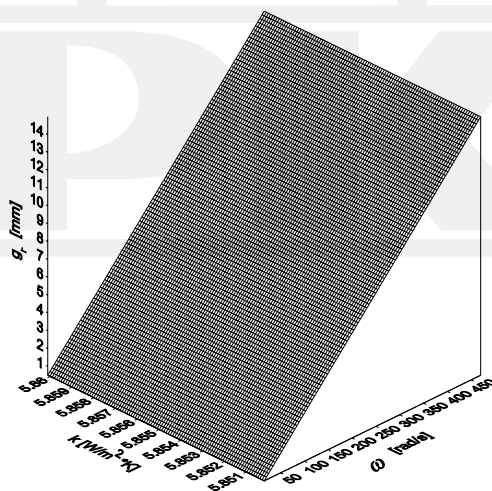


Rys. 4. Zmiana izolacyjności akustycznej R_w i współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości g , (linie stałej grubości płyty) dla PCW

Fig. 4. Changing the acoustic insulation R_w and heat transfer coefficient k with the change of thickness g , (lines of constant thickness of plate) for PCV

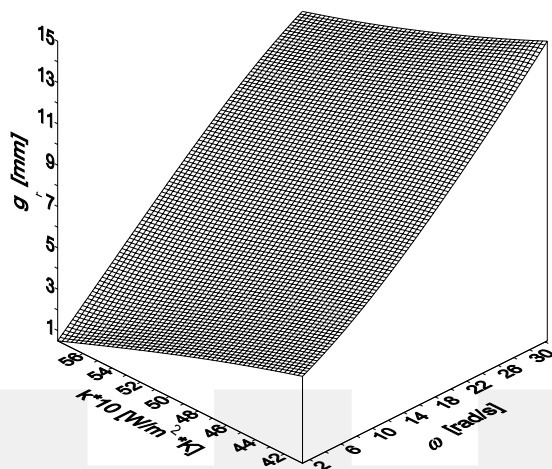
2.2. Analiza zależności częstości drgań własnych ω i współczynnika przenikania ciepła k dla jednowarstwowego elementu poszycia kabiny

Obliczenia symulacyjne dokonano dla materiałów zamieszczonych w tabeli 1. Przykładowe wyniki symulacji pokazano na rys. 5–8.



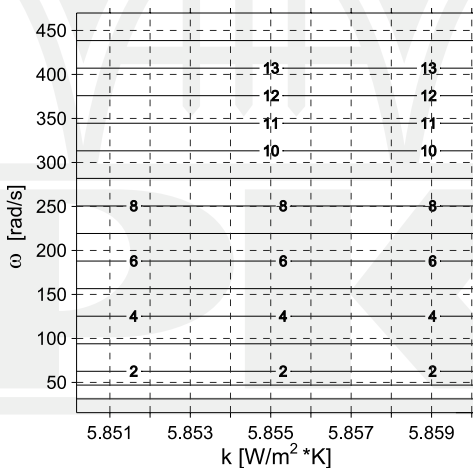
Rys. 5. Zmiana częstości drgań własnych ω płyty i współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości g , dla stali

Fig. 5. Changing the plate natural frequencies ω and heat transfer coefficient k with the change of thickness g , for steel



Rys. 6. Zmiana częstości drgań własnych ω płyty i współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości g_r dla PCW

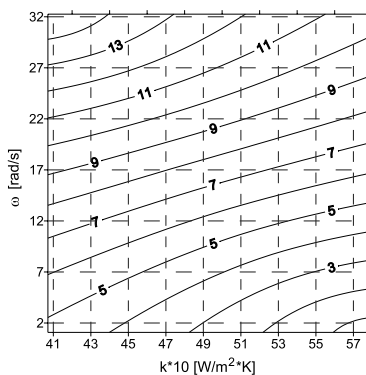
Fig. 6. Changing the plate natural frequencies ω and heat transfer coefficient k with the change of thickness for PCV



Rys. 7. Zmiana częstości drgań własnych ω płyty i współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości g_r (linie stałej grubości płyty) dla stali

Fig. 7. Changing the plate natural frequencies ω and heat transfer coefficient k with the change of thickness g_r (lines of constant thickness of plate) for steel

Analiza wykresów pokazanych na rys. 5–8 potwierdza spostrzeżenia z rozdziału 2.1. Dla poszycia wykonanego ze stali (rys. 5 i 7) wraz ze zmianą grubości ulegają zmianie tylko właściwości drganiowe, przy stałych właściwościach termicznych. Można zatem stwierdzić, że tego typu materiały, w zakresie stosowanych na konstrukcję kabiny grubości, wykazują „wrażliwość” wibroakustyczną przy stałych właściwościach termicznych.



Rys. 8. Zmiana częstości drgań własnych ω płyty i współczynnika przenikania ciepła k wraz ze zmianą grubości g_r (linie stałej grubości płyty) dla PCW

Fig. 8. Changing the plate natural frequencies ω and heat transfer coefficient k with the change of thickness g_r (lines of constant thickness of plate) for PCW

Tworzywa sztuczne (rys. 6 i 8) w rozpatrywanym zakresie grubości charakteryzują się zmiennością zarówno właściwości wibroakustycznych, jak i termicznych. Również tu wyniki symulacji przedstawione zostały w postaci linii stałych grubości materiałów przegrody (rys. 7 i 8).

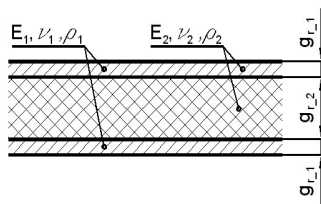
3. Wpływ grubości płyty na częstotliwość koincydencji

Wyniki obliczeń izolacyjności akustycznych dla przegród jedno- i wielowarstwowych (rys. 9 i 10), wg wzorów dostępnych w literaturze, wykazują czasami niezgodność w stosunku do charakterystyk wyznaczonych eksperymentalnie [3], zwłaszcza, kiedy mamy do czynienia z bardziej skomplikowanymi strukturami wielowarstwowymi [6]. Obliczenia przeprowadzane dla tych struktur wymagają stosowania skomplikowanych obliczeń numerycznych. Przyczyną tych niezgodności jest najczęściej zjawisko koincydencji, polegające na zbieżności prędkości fali giętej w płycie ze składową równoległą do powierzchni płyty.



Rys. 9. Przegroda jednowarstwowa (E, ν, ρ – odpowiednio moduł Younga, liczba Poissona i gęstość materiału poszycia)

Fig. 9. One – layer barrier (E, ν, ρ – respectively the Young's modulus, Poisson's ratio and density of the barrier material)



Rys. 10. Przegroda trójwarstwowa typu „sandwich” ($E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, \rho_1, \rho_2$ – odpowiednio moduł Younga, liczba Poissona i gęstość materiałów poszycia)

Fig. 10. Sandwich type tree – layer barrier ($E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, \rho_1, \rho_2$ – respectively the Young’s modulus, Poisson’s ratio and density of the barriers material)

Poniżej przedstawiono wyniki symulacji cyfrowych wpływu zmian grubości materiału na wartość częstotliwości koincydencji, zarówno dla przegród składających się z jednej warstwy, jak i przegród wielowarstwowych.

3.1. Wpływ grubości płyty na częstotliwość koincydencji w przypadku przegród jednowarstwowych

Prezentowane w poprzednim rozdziale obliczenia wpływu grubości materiału na izolacyjność akustyczną właściwą R_w przeprowadzono w oparciu o prawo masy [2].

Wyniki badań dowodzą jednak, że prawo to stanowi jedynie mało dokładne przybliżenie, gdyż nie uwzględnia właściwości fizycznych materiału elementu poszycia, jak też właściwości konstrukcyjnych. Stwierdzono, że przenikanie energii dźwiękowej przez pojedynczą przegrodę jednorodną zależy nie tylko od jej masy, lecz również w istotnym stopniu od sztywności dynamicznej na zginanie.

W zależności od częstotliwości fali dźwiękowej padającej na przegrodę jeden z tych czynników (masa lub sztywność dynamiczna) staje się dominujący.

Dla częstotliwości f spełniającej warunek [4]:

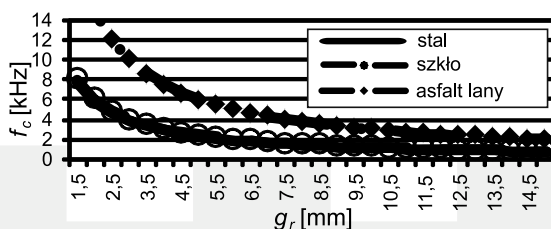
$$f \leq f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} = \frac{c_0^2}{2\pi \cdot g_r} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad (1)$$

gdzie:

- f_c – częstotliwość graniczna (koincydencji), Hz,
- c_0 – prędkość dźwięku w powietrzu, m/s,
- μ – masa powierzchniowa przegrody, kg/m²,
- D – sztywność walcowa płyty na zginanie, Nm,

przenoszenie energii dźwiękowej przez przegrodę odbywa się głównie za pośrednictwem fal podłużnych. W tym zakresie zależność izolacyjności akustycznej od częstotliwości ma charakter zbliżony do wynikającej z prawa masy. Począwszy od częstotliwości $f = f_c$ w przegrodzie powstają fale gięte, które powodują bardziej intensywne przekazywanie energii akustycznej. Powoduje to obniżenie izolacyjności akustycznej w pewnym paśmie częstotliwości.

Na rysunku 11 przedstawiono wyniki symulacji cyfrowych wpływu grubości różnych materiałów przegrody na wartość częstotliwości koincydencji f_c dla przypadku przegród jednowarstwowych. Na wykresach tych widoczne są zróżnicowania wartości częstotliwości koincydencji. Podobne zakresy zmienności częstotliwości granicznej otrzymano jedynie dla przypadku stali i szkła krzemowego. Prezentowane obliczenia dowodzą, że odpowiedni dobór materiałów i ich grubości umożliwia przesunięcie częstotliwości rezonansowych poza zakres słyszalny.



Rys. 11. Zmiana wartości częstotliwości koincydencji f_c wraz ze zmianą grubości materiału dla stali, szkła krzemowego i asfaltu

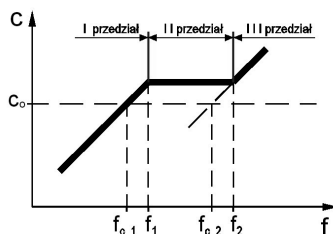
Fig. 11. Changing the value of the coincidence frequency f_c with a change of material thickness, for steel, glass and bitumen

3.2. Wpływ grubości płyty na częstotliwość koincydencji w przypadku przegród trójwarstwowych

W przegrodzie wielowarstwowej, podobnie jak w przegrodzie jednowarstwowej, począwszy od częstotliwości granicznej, izolacyjność akustyczna ulega zmniejszeniu. W celu wyeliminowania bądź złagodzenia wpływu tego zjawiska na charakterystykę izolacyjności akustycznej niezbędne jest przesunięcie częstotliwości krytycznych poza zakres częstotliwości rozpatrywanych przez stworzenie takiego układu, w którym byłyby warunki do powstania i rozprzestrzeniania fal podłużnych wywołujących ścinanie, a nie fal giętnych wywołujących zginanie. Konstrukcja spełniająca te warunki powinna być sztywna na zginanie i podatna na ścinanie. Będzie tak się działo w przegrodzie trójwarstwowej z miękkim, dostatecznie podatnym na odkształcenia postaciowe, jednak nieściśliwym, rdzeniem i z dwiema sztywnymi płytami zewnętrznymi.

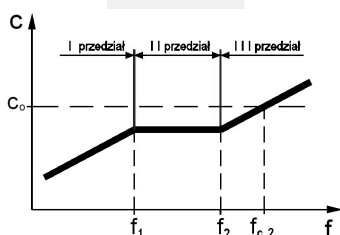
W strukturach typu „sandwich” widoczne są trzy przedziały zachowania fali giętej. W pierwszym przedziale przegroda zachowuje się jak płyta jednorodna, a jej zewnętrzna i wewnętrzna powierzchnia drgają w fazie. W przedziale drugim zachowanie struktury jest regulowane przez fale podłużną wywołującą ścinanie, która propaguje się między powierzchniami zewnętrzną i wewnętrzną. W przedziale trzecim fala gięta przemieszcza się wzdłuż powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej.

Zachowanie fali giętej można przedstawić w postaci wykresów (rys. 12 i 13). Wyróżniono tam omówione wyżej trzy przedziały, rozdzielone częstotliwościami przejścia f_1 , f_2 . W strukturach takich występują jedna lub dwie częstotliwości koincydencji (w zależności od relacji między prędkością rozchodzenia się fali dźwiękowej w powietrzu c_0 i materiale przegrody c), co zostało zobrazowane na niniejszych wykresach.



Rys. 12. Przedziały faz prędkości rozchodzenia się fali giętej w płycie trójwarstwowej – przypadek I

Fig. 12. The ranges of speed of propagation of bending waves in the tree-layer plate – the case I



Rys. 13. Przedziały faz prędkości rozprzestrzeniania się fali giętej w płycie trójwarstwowej – przypadek II

Fig. 13. The ranges of speed of propagation of bending waves in the tree-layer plate – the case II

Częstotliwości koincydencji f_{c-1} dla **I przedziału** oblicza się z zależności (2) [5]:

$$f_{c-1} = c_0^2 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{D_1}} \quad (2)$$

gdzie:

- c_0 – prędkość dźwięku w powietrzu, m/s,
- μ – masa powierzchniowa przegrody trójwarstwowej, kg/m²,
- D_1 – sztywność walcowa płyty na zginanie dla I przedziału [1], Nm,

$$D_1 = \frac{E_1 \cdot g_{r-1} \cdot (g_{r-1} + g_{r-2})^2}{2 \cdot (1 - \nu_1^2)} \quad (3)$$

Do określenia częstotliwości koincydencji f_{c-2} dla III przedziału służy formuła (4):

$$f_{c-2} = c_0^2 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{D_3}} \quad (4)$$

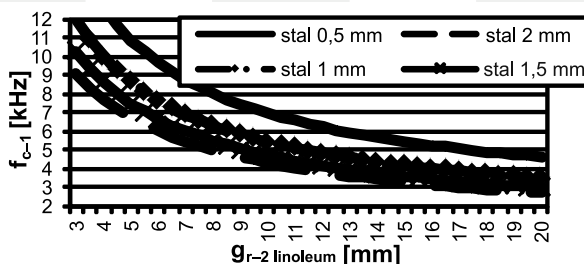
gdzie:

- D_3 – sztywność walcowa płyty na zginanie dla III przedziału [1], Nm.

$$D_3 = \frac{E_1 \cdot g_{r-1}^3}{2 \cdot (1 - \nu_1^2)} \quad (5)$$

Powyższe zależności pozwoliły na przeprowadzenie symulacji numerycznych, których celem było określenie zmian wartości częstotliwości koincydencji wraz ze zmianą grubości materiałów w strukturze trójwarstwowej poszycia. Przykładowe wyniki obliczeń, w postaci wykresów zmian pierwszej częstotliwości koincydencji f_{c-1} , zaprezentowano na rys. 14.

Dla rozważanej struktury wartości pierwszej częstotliwości koincydencji f_{c-1} mieszczą się w zakresie częstotliwości słyszalnych, przy czym wzrostowi grubości warstwy środkowej przegrody (PCW) towarzyszy obniżenie wartości częstotliwości. Wartości drugiej częstotliwości koincydencji f_{c-2} wykraczają poza zakres słyszalny.



Rys. 14. Zmiana wartości pierwszej częstotliwości koincydencji f_{c-1} wraz ze zmianą grubości materiałów przegrody trójwarstwowej dla struktury stal – linoleum (PCW) – stal

Fig. 14. Changing of the first coincidence frequency value, with the change of plate thickness of tree-layer barrier, for structure steel – linoleum (PVC) – steel

4. Podsumowanie

Otrzymane wyniki obliczeń pozwalają zakwalifikować materiały stosowane jako poszycie ścian kabin do dwóch grup:

- materiałów, dla których widoczna jest prawie liniowa zależność pomiędzy współczynnikiem przenikania ciepła k a izolacyjnością akustyczną R_w i częstością drgań własnych ω ,
- materiałów, dla których zależność pomiędzy współczynnikiem k , a izolacyjnością R_w i częstością ω ma wyraźny wykładniczy charakter.

Do pierwszej grupy zaliczyć można materiały takie jak stal, aluminium czy szkło. Dla tej grupy materiałów, dla rozpatrywanych grubości, współczynnik k zmienia się liniowo, natomiast izolacyjność akustyczna ma wyraźny wykładniczy charakter.

Do drugiej grupy będą zaliczane tworzywa sztuczne (takie jak PCV, poliuretan, szkło organiczne) oraz materiały pochodzenia mineralnego (wełna mineralna), dla których zaobserwowano wyraźną nieliniowość izolacyjności R_w i właściwości termicznych, a więc są to materiały, które wykazują wysoką „wrażliwość” wibroakustyczną i cieplną na zmianę ich grubości.

Zamieszczona w ostatnim rozdziale analiza wpływu grubości poszycia na wartość częstotliwości koincydencji pozwala zaobserwować korzyści płynące ze stosowania struktur wielowarstwowych w porównaniu do poszycia jednowarstwowego.

Literatura

- [1] Bremner & O'Keefe, *Calculation of Transmission Loss and Radiation Efficiency of Honeycomb Panels using Finite Element Methods*, SDRC Report #85078 A, Hitchin, UK 1985.
- [2] Dziechciowski Z., *Kształtowanie konstrukcji kabin maszyn roboczych w aspekcie sterowania warunkami pracy operatorów*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
- [3] Dziechciowski Z., *Selection of plate components of cab walls in aspect of thermal insulation and transmission loss*, Archives of Acoustics, 36, 1, 2011, 109-119.
- [4] 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, 269-278.
- [5] Sadowski J., *Podstawy izolacyjności ustrojów*, PWN, Warszawa 1973.
- [6] Sikora J., Turkiewicz J., *Badanie izolacyjności akustycznej przegród dwuciennych z rdzeniami dźwiękochłonnymi z materiałów ziarnistych*, Czasopismo Techniczne z. 1-M/2007.
- [7] Szewczyk K. (kier.), *Kabiny maszyn budowlanych spełniające wymogi ergonomii w zakresie komfortu cieplnego*, Projekt badawczy PB-1445/3/91.

