
ROZPROSZONE DŹWIĘKI

**ANALIZA METOD GEOMETRYCZNYCH
STOSOWANYCH W OPTYCE
POD KĄTEM MOŻLIWOŚCI
ICH ZASTOSOWANIA W AKUSTYCE**

The analysis of geometrical methods
used in optics for their uses in acoustics

Wojciech BINEK, Adam PILCH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
wbinek@agh.edu.pl

STRESZCZENIE

Metoda promieniowa jest jedną z najpopularniejszych metod symulowania propagacji dźwięku. Jej wadą jest konieczność stosowania dużej liczby promieni w celu zapewnienia wystarczającej dokładności symulacji. Potrzebne jest więc znalezienie sposobów modyfikacji metody promieniowej, które umożliwią stosowanie mniejszej liczby promieni.

Podobieństwo problemów występujących przy wszelkich symulacjach metodami geometrycznymi wskazuje, że metody stosowane w optyce z powodzeniem mogą być wykorzystane również w akustyce. W pracy przeanalizowano dwie metody – metodę promieniową z predykcją następnego zdarzenia i metodę dwukierunkowego śledzenia ścieżki.

Stwierdzono, że wykorzystanie obu metod w akustyce jest możliwe, jednak przeszkodę stanowi nieznajomość dwukierunkowych funkcji dystrybucji energii (BRDF). Możliwe jednak jest ich wyznaczenie z wykorzystaniem np. modelu Phong.

Planowane jest wyznaczenie współczynników dla wybranych materiałów do modelu odbicia Phong oraz implementacja powyższych rozwiązań w kodzie programu I-SIMPA.

ABSTRACT

Ray tracing is one of the most popular methods used for sound propagation simulations. Its main disadvantage is a need to use a great number of rays to achieve reliable results. Therefore it is needed to find methods of optimization allowing to reduce the required number of rays.

The similarity of the problems encountered with all the simulations made using geometric methods indicates that it can produce equally good results when applied to acoustics.

Two methods were analyzed – ray tracing with next event estimation and bidirectional path tracing. It was found that both methods can be applied to acoustics after obtaining bidirectional reflectance distribution functions (BRDF). It is possible to estimate the BRDF using for example Phong reflection model. It is planned to estimate coefficients for selected materials in Phong reflection model. Then the method will be implemented in I-SIMPA source code.

1. WSTĘP

Jedną z najpopularniejszych metod symulowania propagacji dźwięku jest metoda promieniowa [1] należąca do grupy metod geometrycznych. Polega ona na losowym generowaniu promieni ze źródła dźwięku. W przypadku natrafienia na przeszkodę promień jest odbijany, a jego energia zmienia się proporcjonalnie do współczynnika odbicia materiału. Odbicie może być odbiciem lustrzanym lub rozproszonym. W przypadku rozproszenia kierunek odbicia dobierany jest zgodnie z prawem Lamberta. Kiedy promień trafi na odbiornik, jego energia jest dodawana do energii zarejestrowanej w odbiorniku w danym przedziale czasu.

Wadą metody promieniowej jest konieczność stosowania dużej liczby promieni w celu zapewnienia wystarczającej dokładności symulacji. Część promieni może nigdy nie trafić do odbiornika (nie mają one wpływu na wynik symulacji) lub ich wpływ na wynik może być mały. Ponieważ nie można przewidzieć, które promienie trafią do odbiornika, trzeba śledzić wszystkie. Przy zbyt małej liczbie promieni wyniki znacznie różnią się w kolejnych symulacjach dla tych samych modeli, co zostało zbadane we wcześniejszych pracach [2]. Szczególnie zależna od liczby promieni jest dokładność odwzorowania pierwszych odbić.

Ponieważ w metodzie promieniowej pierwsze odbicia nie są wyznaczane w sposób deterministyczny, istnieje ryzyko pominięcia niektórych ścieżek. Wskazana jest więc modyfikacja metody pozwalająca zminimalizować liczbę promieni, które są śledzone, ale nie mają wpływu na wynik symulacji.

Powszechnie stosowanym sposobem zwiększenia dokładności symulacji w akustyce jest połączenie metody źródeł pozornych z metodą promieniową. Wtedy pierwsze odbicia wyznaczane są w sposób deterministyczny metodą źródeł pozornych, natomiast rozproszenie dźwięku i ogon pogłosowy symulowane są metodą promieniową. Niestety rozwiązanie to nie jest idealne. Pierwsze odbicia wyznaczane są bardzo dokładnie, jednak dla skomplikowanych geometrii wyznaczenie dużej liczby ścieżek metodą źródeł pozornych jest problematyczne. Co więcej, podejście takie nie rozwiązuje problemu śledzenia promieni niemających wpływu na ostateczny rezultat lub mających wpływ pomijalny.

Metody geometryczne, do których należą opisane powyżej metody, są powszechnie stosowane w generowaniu obrazów w grafice komputerowej. Ograniczenia metod geometrycznych są podobne we wszystkich zagadnieniach, w jakich są stosowane, dlatego postanowiono przeanalizować metody stosowane w grafice komputerowej. Spośród wielu metod wybrano dwie – metodę promieniową z estymacją następnego zdarzenia [3] i metodę dwukierunkowego śledzenia ścieżki [4] (których skuteczność potwierdzono w optyce) oraz postanowiono zbadać możliwość ich zastosowania w symulacjach akustyki.

W rozdziale przeanalizowano metody stosowane w optyce pod kątem możliwości ich wykorzystania w akustyce w celu zmniejszenia wymaganej liczby promieni przy zwiększeniu dokładności symulacji oraz przedstawiono adaptację wybranych metod na potrzeby symulacji propagacji dźwięku.

2. METODY STOSOWANE W RENDEROWANIU OBRAZÓW

W przypadku metod geometrycznych stosowanych w optyce podstawą jest równanie renderowania. Można zapisać je w dwóch formach odpowiadających dwóm podstawowym sposobom renderowania [3]:

$$L(x, \theta_x) = L_e(x, \theta_x) + L_r(x, \theta_x) = L_e(x, \theta_x) + \int_{\Omega_x^{-1}} L(y, \theta_y) f_r(x, \theta_y, \theta_x) |\theta_y \cdot N_x| d\omega_y \quad (1)$$

$$W(x, \theta_x) = W_e(x, \theta_x) + W_r(x, \theta_x) = W_e(x, \theta_x) + \int_{\Omega_y} W(y, \theta_y) f_r(y, \theta_x, \theta_y) |\theta_y \cdot N_y| d\omega_y \quad (2)$$

gdzie:

- $L(x, \theta_x)$ – radiancja w punkcie x pod kątem θ_x od powierzchni,
- $L_e(x, \theta_x)$ – radiancja emitowana przez powierzchnię (*self-emitted radiance*),
- $W(x, \theta_x)$ – potencjał w punkcie x pod kątem θ_x od powierzchni,
- $W_e(x, \theta_x)$ – potencjał emitowany przez powierzchnię (*self-emitted potential*),
- y – punkt poprzedniego odbicia,
- $f_r(x, \theta_x, \theta_y)$ – dwukierunkowa funkcja dystrybucji energii odbitej.

Pierwsze równanie – równanie radiancji – opisuje energię emitowaną do punktu x pod wpływem padania promieni ze wszystkich kierunków. Drugie równanie – równanie potencjału – określa energię emitowaną z powierzchni we wszystkich kierunkach pod wpływem padania jednego promienia. W praktyce równanie radiancji stosowane jest wtedy, kiedy promienie emitowane są z odbiornika – *path tracing*, a równanie potencjału wtedy, kiedy promienie emitowane są z nadajnika – *light tracing*.

W akustyce odpowiednikiem śledzenia promieni z odbiornika jest metoda źródeł pozornych. Różni się ona jednak od optycznego odpowiednika. W akustyce źródła dźwięku zazwyczaj modelowane są jako źródła punktowe, stąd prawdopodobieństwo losowego trafienia z odbiornika w źródło dźwięku dąży do zera. W renderowaniu obrazów źródła światła mają zazwyczaj większą powierzchnię od powierzchni odbiornika, stąd prawdopodobieństwo losowego trafienia z odbiornika w źródło światła jest większe niż w przeciwnym kierunku. Dlatego w akustyce ścieżki promieni muszą być określone deterministycznie, natomiast w optyce promienie generowane są w sposób losowy.

Śledzenie promieni z nadajnika do odbiornika w optyce i akustyce odbywa się na tej samej zasadzie, jednak o ile w przypadku akustyki jest to najczęściej stosowana metoda, to w przypadku optyki zazwyczaj sprawdza się ona gorzej od śledzenia w przeciwnym kierunku.

3. DWUKIERUNKOWA FUNKCJA DYSTRYBUCJI ODBICIA – MODEL PHONGA

Dwukierunkowa funkcja dystrybucji odbicia (*bidirectional reflectance distribution function*, BRDF) pozwala na wyznaczenie energii promienia odbitego od powierzchni pod zadaniem kierunkiem pod warunkiem znajomości kierunku promienia padającego i właściwości materiału.

Z definicji [3] jest to:

$$f(x, \theta_i, \theta_o) = \frac{\partial L_{output}(x, \theta_o)}{L_{input}(x, \theta_i) |\theta_i \cdot N_x| \partial \omega_i} \quad (3)$$

gdzie:

- $\partial L_{output}(x, \theta_o)$ – energia emitowana przez powierzchnię x na kierunku θ_o ,
- $L_{input}(x, \theta_i)$ – energia padająca na powierzchnię x z otoczenia $\partial \omega_i$ kąta θ_i ,
- $|\theta_i \cdot N_x|$ – moduł funkcji cos kąta padania do normalnej powierzchni.

W akustyce stosuje się dwie funkcje BRDF pozwalające opisać energię odbitą jako:

$$E_{ref} = \begin{cases} (1-\alpha)E_{inc} & \text{dla } \theta_o = -\theta_i \text{ dla pozostałych} \\ 0 & \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{ref} = (1-\alpha)E_{inc} |\theta_o \cdot N_x| \quad (5)$$

gdzie:

- α – współczynnik pochłaniania dźwięku materiału,
- E_{ref} – energia odbita pod kątem θ_o ,
- E_{inc} – energia padająca na powierzchnię.

Wzór (4) opisuje odbicie lustrzane, wzór (5) rozproszenie zgodnie z prawem Lamberta. Równania są odpowiednio prawdziwe tylko dla powierzchni idealnie odbijającej i idealnie rozpraszającej. Rzeczywiste powierzchnie modeluje się jako połączenie powierzchni idealnie odbijającej i idealnie rozpraszającej, co nie jest fizycznie poprawne. W akustyce nie są wykorzystywane funkcje BRDF łączące odbicie lustrzane i rozproszenie dźwięku.

Na potrzeby optyki powstało wiele modeli pozwalających wyznaczyć funkcję BRDF uwzględniającą zarówno odbicie lustrzane, jak i rozproszenie światła. Jednym z najczęściej stosowanych jest model odbicia Phong'a [5]:

$$E_{\text{ref}} = E_{\text{inc}} \left[C_p \left[\cos(\theta_i)(1-d) + d \right] + W(\theta_i) \left[\cos(s) \right]^n \right] \quad (6)$$

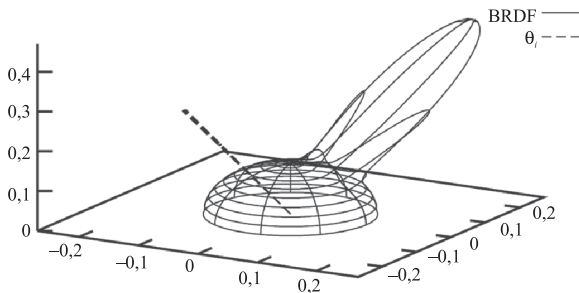
gdzie:

- C_p – współczynnik odbicia materiału,
- d – środowiskowy współczynnik odbicia rozproszonego,
- $W(\theta_i)$ – funkcja określająca stosunek odbicia lustrzanego do rozproszonego w zależności od kąta padania promienia θ_i ,
- s – kąt pomiędzy kierunkiem odbicia lustrzanego a kierunkiem obserwacji,
- n – potęga symulująca kształt odbicia lustrzanego.

Zakładając, że $d = 0$, a stosunek odbicia lustrzanego do rozproszonego jest stały, równanie (6) można uprościć do następującej postaci:

$$E_{\text{ref}} = E_{\text{inc}} \left[C_p \left[\cos(\theta_i) \right] + C_s \left[\cos(s) \right]^n \right] \quad (7)$$

Przykładową funkcję BRDF uzyskaną z modelu Phong'a dla stałego kąta padania przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Funkcja BRDF z modelu Phong'a dla stałego kąta padania [3]

Aby model można było stosować, niezbędnie jest wyznaczenie współczynników C_p , C_s i n . Niestety w przypadku dźwięku nie są one znane, co stanowi główną przeszkodę do stosowania metod optyki w akustyce.

W ramach dalszych prac planowane jest wyznaczenie współczynników modelu Phonga wybranych materiałów dla dźwięku. W komorze bezdechowej zmierzone zostaną charakterystyki rozproszenia materiałów dla różnych kątów padania [6], a następnie będą dobrane takie współczynniki, dla których model będzie najbliższy wynikom pomiarów. Następnie zostanie sprawdzone, czy można powiązać współczynniki modelu Phonga z parametrami materiałów powszechnie stosowanymi w akustyce.

4. METODA PROMIENIOWA Z ESTYMACJĄ NASTĘPNEGO ZDARZENIA

W większości przypadków objętość odbiorników jest mała w porównaniu do objętości pomieszczenia, więc prawdopodobieństwo, że promień trafi do odbiornika, jest niewielkie, a wyniki symulacji cechuje duża wariancja. Problem ten dotyczy zarówno akustyki [2], jak i optyki [3]. Metoda promieniowa z estymacją następnego zdarzenia (*light tracing with next event estimation*) [3] rozwiązuje ten problem przez wprowadzane promieni pozornych (*shadow rays*).

Ponieważ w akustyce bardziej efektywne jest śledzenie promienia z nadajnika do odbiornika, wykorzystane zostało równanie renderowania dla potencjału. W metodzie promieniowej z estymacją następnego zdarzenia człon równania renderowania dla potencjału (2) odpowiedzialny za potencjał odbijany przez powierzchnię rozbijany jest na dwie całki:

$$\begin{aligned}
 W_r(x, \theta_x) &= \int_{\Omega_y} W(y, \theta_y) f_r(y, \theta_x, \theta_y) |\theta_y \cdot N_y| d\omega_y = \\
 &= \int_{\Omega_y} [W_e(y, \theta_y) + W_r(y, \theta_y)] f_r(y, \theta_x, \theta_y) |\theta_y \cdot N_y| d\omega_y = \\
 &= \int_{\Omega_y} W_e(y, \theta_y) f_r(y, \theta_x, \theta_y) |\theta_y \cdot N_y| d\omega_y + \\
 &+ \int_{\Omega_y} W_r(y, \theta_y) f_r(y, \theta_x, \theta_y) |\theta_y \cdot N_y| d\omega_y = \\
 &= \int_{\text{odbiornik}} W_e(y, \theta_{y \rightarrow z}) f_r(y, \theta_x, \theta_{y \rightarrow z}) \frac{|\theta_{y \rightarrow z} \cdot N_y| |\theta_{y \rightarrow z} \cdot V|}{\|y - z\|^2} d\mu_z + \\
 &+ \int_{\Omega_y} W_r(y, \theta_y) f_r(y, \theta_x, \theta_y) |\theta_y \cdot N_y| d\omega_y
 \end{aligned} \tag{8}$$

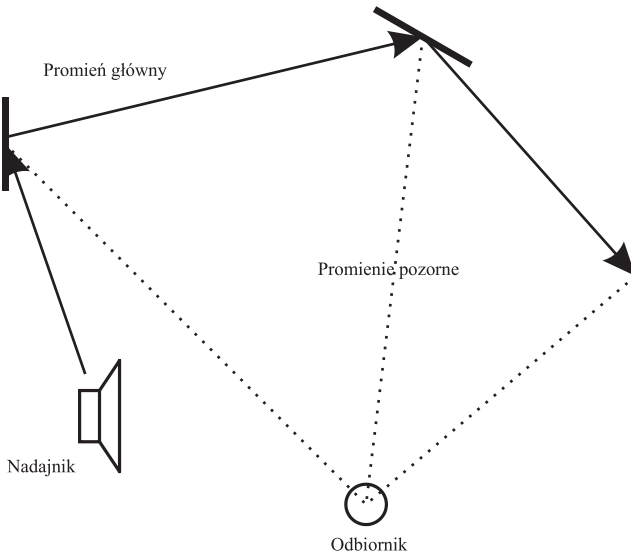
gdzie:

V – kierunek obserwacji odbiornika,

z – położenie odbiornika.

Pierwszy człon otrzymanego równania charakteryzuje energię emitowaną w kierunku odbiornika, natomiast drugi opisuje energię emitowaną w pozostałych kierunkach (rys. 2). Oznacza to, że w momencie padania promienia na powierzchnię generowane jest po jednym promieniu do każdego odbiornika oraz jeden promień niosący pozostałą energię. W ten sposób zapewnione jest wielokrotne trafienie każdego wygenerowanego promienia do każdego z odbiorników.

Rozwiązanie takie prowadzi to lawinowego wzrostu liczby promieni. Aby ograniczyć ten efekt, konieczna jest modyfikacja metody polegająca na przypisaniu promieni pozornych do poszczególnych odbiorników. Wtedy promienie generowane do odpowiednich odbiorników mogą być zarejestrowane tylko przez nie, a po dotarciu do odbiornika są usuwane. W takiej sytuacji promień główny niesie całą energię odbijaną przez powierzchnię, ale nie jest rejestrowany przez odbiorniki.



Rys. 2. Metoda promieniowa z estymacją następnego zdarzenia – schemat

Biorąc pod uwagę przedstawione wcześniej modyfikacje, wzory można uprościć. Energię promienia głównego można opisać za pomocą zależności:

$$E_{\text{ref}} = E_{\text{inc}}(1 - \alpha) \quad (9)$$

gdzie:

- E_{ref} – energia promienia odbitego,
- E_{inc} – energia promienia padającego,
- α – współczynnik pochłaniania dźwięku.

Energję promieni pozornych można zapisać jako:

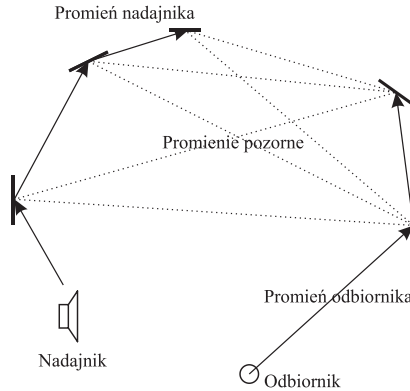
$$E_{sh} = E_{inc}(1 - \alpha) \int_{odbiornik} W_e(y, \theta_{y \rightarrow z}) f_r(y, \theta_x, \theta_{y \rightarrow z}) \frac{|\theta_{y \rightarrow z} \cdot N_y| |\theta_{y \rightarrow z} \cdot V|}{\|y - z\|^2} d\mu_z \quad (10)$$

Dodatkowo dla odbiornika punktowego wzór (10) upraszcza się do:

$$E_{sh} = E_{inc}(1 - \alpha) f_r(y, \theta_x, \theta_{y \rightarrow z}) |\theta_{y \rightarrow z} \cdot N_y| \quad (11)$$

5. METODA DWUKIERUNKOWEGO ŚLEDZENIA ŚCIEŻKI

Metoda dwukierunkowego śledzenia ścieżki [4] również wykorzystuje promienie pozorne i funkcję BRDF, jednak promienie generowane są zarówno z nadajnika, jak i odbiornika (rys. 3). W momencie padania promieni na powierzchnię punkty odbić są ze sobą łączone, w wyniku czego tworzy się siatka promieni pozornych. Promienie pozorne łączą wirtualne nadajniki punktowe z wirtualnymi odbiornikami punktowymi [3].



Rys. 3. Metoda dwukierunkowego śledzenia ścieżki – schemat

Energję promienia pozornego w symulacjach akustycznych metodą dwukierunkowego śledzenia ścieżki można opisać jako:

$$E_{sh} = E_{inc}(1 - \alpha_s) f_s(x, \theta_s, \theta_{x \rightarrow y})(1 - \alpha_r) f_r(y, \theta_x, \theta_{y \rightarrow r}) \cdot |\theta_{x \rightarrow y} \cdot N_x| |\theta_{y \rightarrow r} \cdot N_y| e^{-\gamma \|y - x\|} \quad (12)$$

gdzie:

γ – współczynnik tłumienia dźwięku w powietrzu,

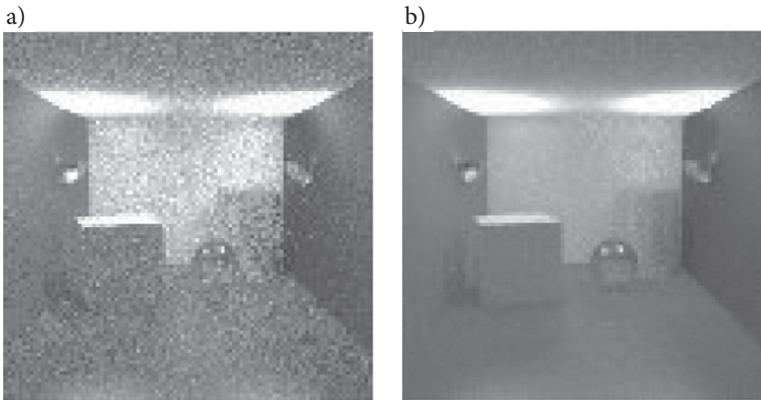
$\|y - x\|$ – odległość pomiędzy wirtualnym nadajnikiem a wirtualnym odbiornikiem.

Energiją promienia padającego na odbiornik po n odbiciach promienia nadajnika i m odbiciach promienia odbiornika można opisać wzorem (13):

$$E_{\text{rec}} = E(1 - \alpha_s) f_s(x, \theta_s, \theta_{x \rightarrow y}) (1 - \alpha_r) f_r(y, \theta_x, \theta_{y \rightarrow r}) \cdot \left| \theta_{x \rightarrow y} \cdot N_x \right| \left| \theta_{y \rightarrow r} \cdot N_y \right| e^{-\gamma \|y-x\|} \times \\ \times \prod_{i=1}^n (1 - \alpha_{s,i}) e^{-\gamma \|x_{s,i} - x_{s,i-1}\|} \cdot \prod_{j=1}^m (1 - \alpha_{r,j}) e^{-\gamma \|x_{r,j} - x_{r,j-1}\|} \quad (13)$$

Pierwsza część wzoru opisuje promień pozorny prowadzący z punktu padania promienia nadajnika do punktu padania promienia odbiornika. Iloczyn dla $i = 1, \dots, n$ opisuje ścieżkę propagacji promienia nadajnika, a iloczyn dla $j = 1, \dots, m$ opisuje ścieżkę propagacji promienia odbiornika.

Podobnie jak w metodzie promieniowej z estymacją następnego zdarzenia, metoda dwukierunkowego śledzenia ścieżki zapewnia, że każdy promień wielokrotnie wyznaczy ścieżkę pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem. Dodatkowo zastosowanie tej metody prowadzi do znacznego wzrostu dokładności symulacji w pobliżu odbiornika i w obszarach, do których nie docierają promienie bezpośrednie według E. Lafortune'a [3]; spadek RMS szumu w obszarach, które nie są bezpośrednio oświetlone, sięga 50% (rys. 4).



Rys. 4. Wyniki renderowania metodą promieniową z estymacją następnego zdarzenia (a) i metodą dwukierunkowego śledzenia ścieżki (b) dla prównywalnej całkowitej liczby promieni [3]

6. PODSUMOWANIE

W ramach dotychczasowych prac udało się znaleźć i dostosować na potrzeby akustyki metody stosowane w renderowaniu obrazów w optyce. Metody te, wykorzystane w optyce, pozwalają na zwiększenie dokładności obliczeń metodą promieniową, przy zachowaniu lub zmniejszeniu liczby promieni.

Metoda promieniowa z estymacją następnego zdarzenia zapewnia, że każdy promień wielokrotnie trafi do każdego odbiornika. Metoda dwukierunkowego śledzenia ścieżki oprócz gwarancji, że każdy promień trafi do każdego odbiornika, zwiększa dokładność symulacji w pobliżu odbiornika. Obie metody zastosowane w akustyce powinny zwiększyć dokładność symulacji i zmniejszyć wymaganą liczbę promieni.

Funkcje BRDF pozwalają wyznaczyć energię odbitą od materiału przy uwzględnieniu zarówno składowej odbitej lustrzanie, jak i rozproszonej. Niestety nieznaną współczynników pozwalających określić funkcje BRDF dla odbicia dźwięku nie pozwala obecnie na stosowanie metody promieniowej z estymacją następnego zdarzenia i metody dwukierunkowego śledzenia ścieżki w akustyce.

Planowane jest wykonanie pomiarów dystrybucji odbitej energii dla wybranych materiałów i powiązanie współczynników w modelu odbicia Phonga z parametrami akustycznymi, co pozwoli na wyznaczenie przybliżonych funkcji BRDF i umożliwi wykorzystanie przedstawionych metod w symulacjach akustyki.

Następnie metoda promieniowa z predykcją następnego kroku i metoda dwukierunkowego śledzenia ścieżki mają zostać zaimplementowane w kodzie programu I-SIMPA i zweryfikowane w zastosowaniach akustycznych.

LITERATURA

- [1] Long M.: *Architectural Acoustics*, London 2006
- [2] Binek W.: *Weryfikacja darmowego oprogramowania do symulacji parametrów akustycznych pomieszczeń*, praca inżynierska, AGH, Kraków 2015
- [3] Lafortune E.: *Mathematical Models and Monte Carlo Algorithms*, Katholieke Universiteit, Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Leuven 1996
- [4] Lafortune E., Willems Y.: *Bi-Directional Path Tracing*, *Proceedings of CompuGraphics*, Alvor, Portugal, 1993, 145–153
- [5] Phong B.: *Illumination for computer generated pictures*, *Communications of ACM*, 1975, 18, 311–317
- [6] Pilch A., Kamisiński T., Zastawnik M.: *Comparison of Pressure and Intensity Methods in Evaluating the Directional Diffusion Coefficient*, *Acta Physica Polonica A*, 2013, 123, 6, 1054–1058

WERYFIKACJA ZAŁOŻENIA
METODY TOMATISA
DOTYCZĄCEGO LATERALIZACJI SŁUCHOWEJ
MUZYKÓW

Aural lateralization – verification of the Tomatis' theses

**Beata LUDWIŃSKA, Zbigniew ŁATKA,
Aleksandra MAJCHRZAK, Monika SOBOLEWSKA**

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
beataludwinska@gmail.com

STRESZCZENIE

U podstaw metody Tomatisa leży założenie, że źródłem problemów z mową i analizą treści są problemy ze słuchaniem. Drugim czynnikiem mającym wpływ na jakość odbioru przekazywanej treści jest lateralizacja słuchowa. Tezy te oparte są na badaniach Tomatisa, który podawał śpiewakom operowym szum na prawe ucho, co powodowało u nich fałszowanie. Miało to symulować ubytki słuchu u śpiewaków spowodowane pracą w niewłaściwym środowisku akustycznym. Badania wykazały, że lepsze słuchanie skutkuje poprawą jakości mowy. Prowadzone w ramach poniższych badań testy miały na celu powtórzenie badań zaproponowanych przez Tomatisa oraz rozszerzenie stawianych przez niego tez. Sprawdzona została zdolność do czystego śpiewania z szumem filtrowanym, podawanym na prawe lub lewe ucho.

ABSTRACT

The basic assumption underlying the Tomatis Method is that the problem with listening is the main source of speech and content analysis problems. The second factor influencing perception and cognition is aural lateralization. Those thesis are based on Tomatis' studies. He tested opera singers by having them sing with noise in the right ear, what caused out-of-tune singing. The noise was to simulate hearing losses caused by working in an improper acoustic environment. The studies indicated, that better hearing results in better speech quality. The aim of the tests run under this project is to replicate Tomatis' studies and broaden his theses. We checked the ability to sing in tune with filtered noise in right and left ear.

1. WSTĘP

Podczas swojej praktyki lekarskiej Alfred Tomatis zauważył podobne problemy ze słuchem i głosem zarówno u śpiewaków operowych, jak i pracowników fabryk. Stwierdził też, że tradycyjne metody leczenia są nieefektywne, dlatego rozpoczął badania mające na celu opracowanie skutecznej terapii. Tomatis przeprowadził wśród śpiewaków operowych eksperyment, w którym podawał im szum kolejno na lewe i prawe ucho, uniemożliwiając tym samym kontrolę nad głosem danym uchem. W tym czasie osoba badana miała za zadanie śpiewać. Okazało się, że gdy miała ona zaszumione lewe ucho, jej głos stawał się niepewny i lekko drżący, natomiast przy zaszumionym prawym uchu słyszalne były wyraźne zmiany w głosie, niepewność, a nawet fałsz [1].

Z powyższych badań Tomatis wysunął dwa wnioski. Pierwszy z nich dotyczył zjawiska lateralizacji, czyli asymetrii czynnościowej prawej i lewej strony ciała. Alfred Tomatis uważał, że podobnie jak w przypadku innych części ciała, człowiek może być prawo- lub lewouszny [1]. Podstawą tego założenia jest asymetria mózgu. Poszczególne ośrodki znajdują się w różnych półkulach; najbardziej związane ze zmysłem słuchu są ośrodki odpowiadające za logikę, analizę i mowę. Ośrodek słuchu oraz wszystkie wcześniej wymienione obszary znajdują się w lewej półkuli mózgu. Dodatkowo, bardzo istotny jest fakt, że istnieje więcej połączeń krzyżowych między półkulami mózgowymi a częściami ciała człowieka [2]. Mając tę wiedzę, Tomatis wywnioskował, że prawidłowa lateralizacja jest prawouszna, ponieważ ze względu na większą liczbę połączeń sygnał

odbierany przez ucho może być przekazany szybciej do mózgu, co z kolei umożliwi szybszą analizę i reakcję. Dodatkowym atutem połączenia krzyżowego jest mniejsza ilość występujących zakłóceń oraz utraconych informacji. Osoby prawouszne mają mniej problemów ze zrozumieniem mowy i prawidłowym reagowaniem, są bardziej skoncentrowane na treści przekazu niż jego ładunku emocjonalnym, co z kolei charakteryzuje osoby o lateralizacji lewousznej [2].

Drugi wniosek Tomatisa dotyczył percepcji i naśladowania poszczególnych dźwięków. Uważał on, że głos zawiera tylko te częstotliwości, które może usłyszeć ucho [1]. Oznacza to, że człowiek z niedosłuchem będzie miał problemy z artykulacją niektórych głosek. Dalej wnioskując, stwierdził, że modyfikacja sposobu słyszenia powoduje automatyczną nieświadomą zmianę głosu, co zostało potwierdzone przez jego badanie.

2. OPIS EKSPERYMENTU

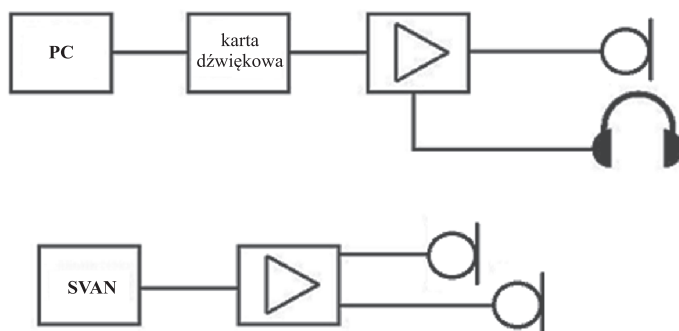
Celem przeprowadzanego eksperymentu było przede wszystkim powtórzenie badań Alfreda Tomatisa, a więc sprawdzenie, czy rzeczywiście podawanie szumu na prawe ucho spowoduje zmniejszenie kontroli nad głosem, a co za tym idzie – nieczyste śpiewanie. Badanie zostało jednak rozszerzone, a podstawą do tego rozszerzenia było dosłownie potraktowane stwierdzenie „głos zawiera tylko to, co usłyszy ucho” (fr. *la voix ne contient que ce que l'oreille entend*). W tej części badania szum dodatkowo był filtrowany do częstotliwości danej melodii. Dokonano również analizy widmowej głosu, gdyż – jak twierdził Tomatis, a co potwierdziły badania – szum ma również wpływ na barwę głosu. Ze względu na skoncentrowanie się na samej lateralizacji słuchowej, eksperyment został skojarzony z badaniami przeprowadzonymi przez Alfreda Tomatisa, a nie na przykład z efektem Lombarda. W przeprowadzanym badaniu ważniejsze było wskazanie różnic w śpiewie z szumem w prawym i lewym uchu niż opisanie zmiany głosu w ogóle.

Badanie Alfreda Tomatisa przeprowadzone zostało w grupie profesjonalnych śpiewaków operowych. Na potrzeby tego projektu nie udało się skompletować wystarczająco licznej grupy badawczej, zatem eksperyment przeprowadzony został także na osobach w różny sposób związanych z muzyką, mających wykształcenie muzyczne: podstawowe, średnie, wyższe bądź amatorskie, z których większość śpiewa bądź śpiewało w chórze.

Uczestnicy badania byli proszeni o śpiewanie gamy durowej naturalnej i prostej rozpiewki wokalne od wybranego przez siebie dźwięku. Na początku śpiewano bez żadnych zakłóceń. Następnie przez słuchawki podawane były kolejno szумы na prawe i lewe ucho: przefiltrowane do częstotliwości, które były używane podczas śpiewania, przefiltrowane do częstotliwości spoza tego zakresu i niefiltrowany w ogóle szum biały. Filtry nie były dostosowywane za każdym razem idealnie do skali głosu danej osoby, przyjęto dwa ustawienia filtrów: oddzielnie dla kobiet i oddzielnie dla mężczyzn, uśredniając tym samym męską i żeńską skalę głosu, do częstotliwości 220–520 Hz dla kobiet i 100–220 Hz dla mężczyzn.

Badane osoby śpiewały gamę i rozśpiewkę trzykrotnie, aby uniknąć przypadkowości, za każdym razem analizowane było ostatnie powtórzenie. Dodatkowo, śpiewające osoby poddawane były badaniu audiometrycznemu w celu wykluczenia anomalii wynikających z uszkodzeń słuchu. Poziom szumu za każdym razem dobierany był indywidualnie, tak aby śpiewająca osoba nie słyszała własnego głosu uchem, w którym był szum. Poziom szumu i głosu docierającego do ucha śpiewającej osoby mierzony był miernikiem SVAN, dzięki zastosowaniu mikrofonów dousznych. Schemat wykorzystanego toru pomiarowego został przedstawiony na rysunku 1. Średnia różnica między poziomem ciśnienia akustycznego głosu i szumu wynosiła 12,1 dB. Aby umożliwić przeanalizowanie badanych osób ze względu na różne czynniki takie jak płeć, lateralizacja i rodzaj wykształcenia, przeprowadzona została ankieta zawierająca 12 pytań.

Śpiew rejestrowano w komorze bezdechowej, tak aby zniwelować hałasy otoczenia, a następnie analizowano za pomocą autorskiego programu w Matlabie. Badania odbyły się dwukrotnie, za pierwszym razem przebadanych zostało dziewięć osób, za drugim piętnaście. Z tych 24 osób wykluczone zostały dwie – mężczyzna, który nie spełniał wymagań dotyczących wykształcenia muzycznego, oraz kobieta ze znacznym niedosłuchem uniemożliwiającym czyste śpiewanie nawet w warunkach bez zakłóceń. Ostatecznie przeanalizowano dwunastu mężczyzn i dziesięć kobiet, w wieku od 16 do 44 lat, przy czym 80% z nich mieściła się w przedziale wiekowym 20–25 lat.



Rys. 1. Schemat wykorzystanego toru pomiarowego

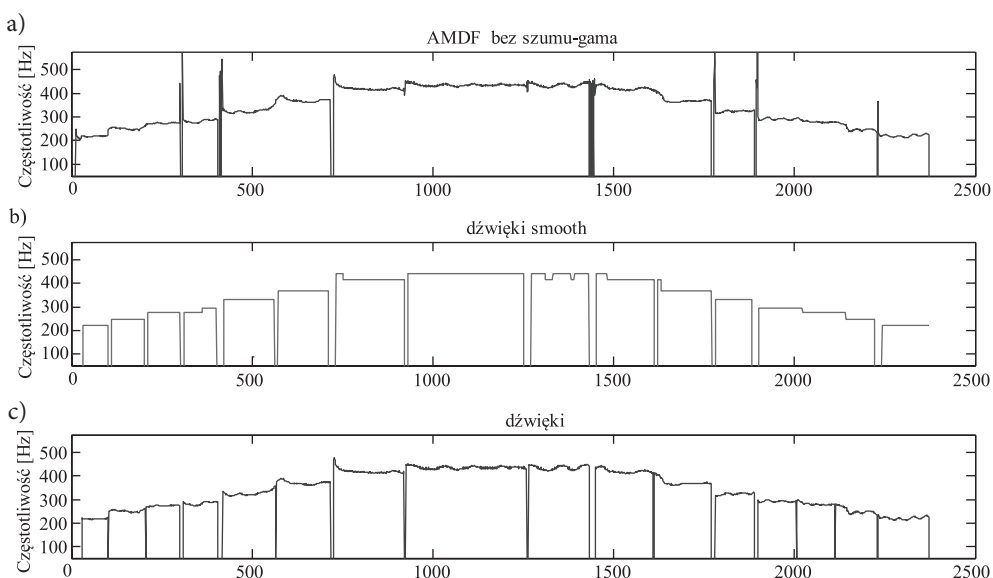
Do analizy nagrań wykorzystano stworzony specjalnie na potrzeby badań program, zaimplementowany w środowisku Matlab. Kolejne etapy procesu analizy przedstawia schemat:

ekstrakcja tonu podstawowego f_0 \longrightarrow segmentacja dźwięków \longrightarrow statystyka

W celu uzyskania ekstrakcji tonu podstawowego f_0 o wysokiej rozdzielczości i dokładności wykorzystano hybrydową metodę łączącą wstępną filtrację sygnału, algorytm funkcji różnicowej AMDF (*Average Mean Difference Function*) badający okresowość sygnału oraz

krótkoczasowy pomiar energii sygnału w celu oznaczenia bezdźwięcznych fragmentów nagrań. Przy próbkowaniu sygnału $f_s = 48$ kHz uzyskano rozdzielczość częstotliwościową na poziomie 5 centów (cent – jedna setna półtonu). Aby móc kompleksowo ocenić stopień „fałszowania”, dla kolejnych nagrań należało dokonać segmentacji kolejnych dźwięków z otrzymanego wektora f_0 . Użyteczne okazało się odpowiednie wygładzanie przebiegów. Na tym etapie zastosowanie znalazła również seria modeli statystycznych, umożliwiająca rozdzielenie kolejnych dźwięków na podstawie predykcji prawidłowej wysokości dźwięku (rys. 2b), a następnie określenie czasu ich trwania oraz występowania nagłych skoków częstotliwości.

Końcowym etapem działania programu było generowanie indywidualnych oraz zbiorowych statystyk, umożliwiających szybką i obiektywną ocenę dowolnie dużej grupy badanych.

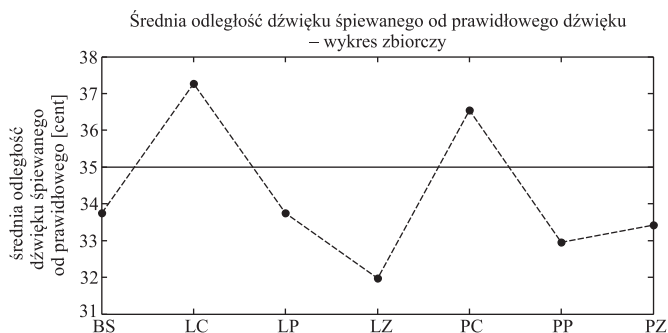


Rys. 2. Wykres ilustrujący ekstrakcję dźwięków: a) f_0 z wydzieleniem bezdźwięcznych fragmentów; b) przebieg wygładzony i dopasowany do prawidłowej gamy; c) końcowy efekt segmentacji

3. ANALIZA TONU PODSTAWOWEGO

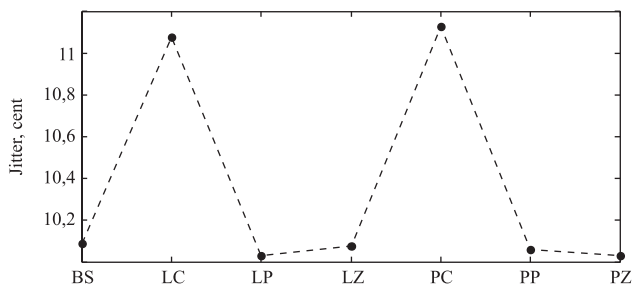
Do analizy i porównania otrzymanych wyników użyto dwóch parametrów – średniej odległości wysokości dźwięku śpiewanego od prawidłowego dźwięku oraz parametru Jitter, który opisuje fluktuacje częstotliwości podstawowej f_0 kolejnych dźwięków [3]. Obydwa parametry wyrażone zostały w centach. Każda osoba została przeanalizowana osobno, a następnie stworzone zostały wykresy zbiorcze. Dla rysunków 3–12 przyjęto następujące

skrótów na osi poziomej: BS – bez szumu, L – szum w uchu lewym, P – szum w uchu prawym, P – szum pasmowo-przepustowy, Z – szum pasmowo-zaporowy, C – szum szerokopasmowy.



Rys. 3. Średnia odległość dźwięku śpiewanego od prawidłowego dźwięku – wykres zbiorczy

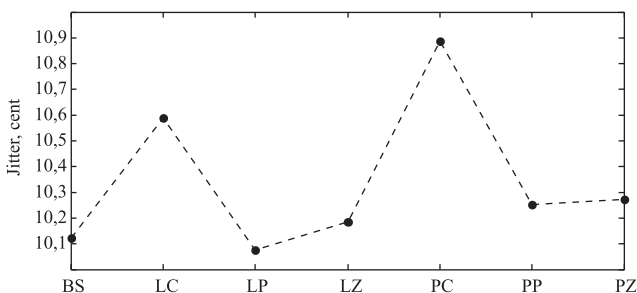
Poziomą linią na wykresie została oznaczona granica fałszowania – wszystkie dźwięki poniżej tej linii odbieramy jako zaśpiewane czysto, a powyżej jako „zafałszowane”. Granica ta została przyjęta umownie, ponieważ bardzo trudno znaleźć jednoznaczną definicję JND (*Just Noticeable Difference* – najmniejsza zauważalna różnica) wysokości dźwięku. Granica czystego śpiewania została wyznaczona na 35 centów na podstawie analizy słuchowej i statystycznej nagrań osoby ze słuchem absolutnym i zweryfikowana na innych nagraniach. Na wykresie (rys. 3) obserwujemy wyraźny trend w postaci dwóch lokalnych maksimów przekraczających wyznaczoną granicę. Pierwszy z nich jest wartością dla zaszumionego szerokopasmowo lewego ucha. Obserwujemy wówczas znaczny wzrost średniej odległości dźwięku śpiewanego od prawidłowego, czyli większe „zafałszowanie” w porównaniu do innych wykonania. Podobnie dzieje się w przypadku prawego ucha. Można zatem potwierdzić tezę, że zakłócenie słyszenia jednym uchem powoduje pogorszenie kontroli nad głosem. Na podstawie otrzymanych wyników trudno jednak stwierdzić, czy bardziej uciążliwy jest szum w prawym, czy w lewym uchu, ponieważ różnice dla prawego i lewego ucha nie są znaczne.



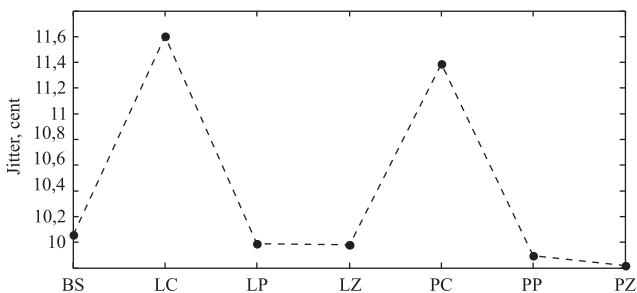
Rys. 4. Średnia wartość parametru Jitter – wykres zbiorczy

Na wielkość parametru Jitter mają wpływ: naturalny tembr głosu, vibrato oraz glissanda, czyli sposób przechodzenia z dźwięku na dźwięk. Zazwyczaj badane osoby, szczególnie podczas śpiewania z szumem, nie trafiały od razu w odpowiedni dźwięk, ale odrobinę wyżej bądź niżej i dopiero wtedy korygowały wysokość dźwięku. Glissanda mają zatem największy wpływ na parametr Jitter. Na wykresie (rys. 4) widać bardzo wyraźny trend – największą wartość parametr przyjmuje podczas śpiewania z szumem o pełnym paśmie, czy to w prawym, czy w lewym uchu. Szum znacznie utrudnia wyobrażenie sobie dźwięku i powoduje trudności z ustaleniem odpowiedniej wysokości dźwięku i szybką jej korekcją. Ciekawe jest, że otrzymano charakterystyczne lokalne wartości maksymalne dla nagrań z szumami właśnie o pełnym paśmie – można zatem wnioskować, że większe znaczenie od tego, na które ucho został podany szum, ma sam rodzaj tego szumu. Nie są to jednak duże różnice, należy zwrócić uwagę na opis osi pionowej – różnice między najmniejszą i największą wartością parametru Jitter sięgają około jednego centa. Niemniej jednak trend ten jest wyraźny i charakterystyczny.

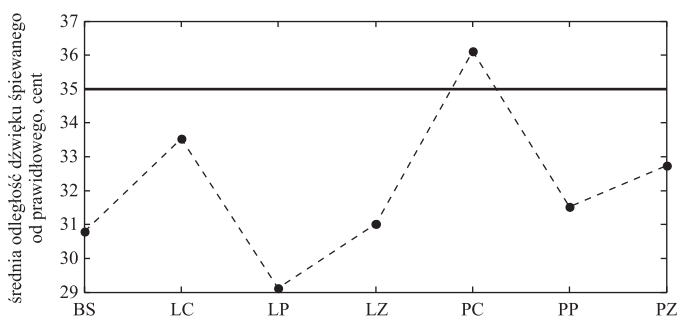
Gdy porównane zostały wyniki otrzymane oddzielnie dla grupy kobiet oraz dla grupy mężczyzn (rys. 5–8), okazało się, że płeć nie ma większego znaczenia dla czystego śpiewania z szumem czy bez szumu. Ogólny wniosek jest taki, że mężczyźni śpiewają bardziej niedbale od kobiet, robią więcej błędów, co objawia się wyższą wartością parametru Jitter i większą średnią odległością od prawidłowego dźwięku.



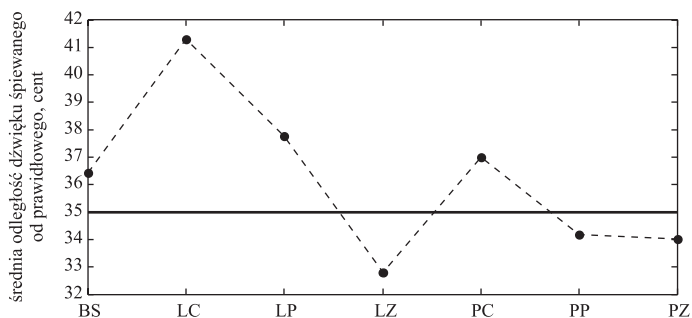
Rys. 5. Średnia wartość parametru Jitter – kobiety



Rys. 6. Średnia wartość parametru Jitter – mężczyźni



Rys. 7. Średnia odległość dźwięku śpiewanego od prawidłowego dźwięku – kobiety

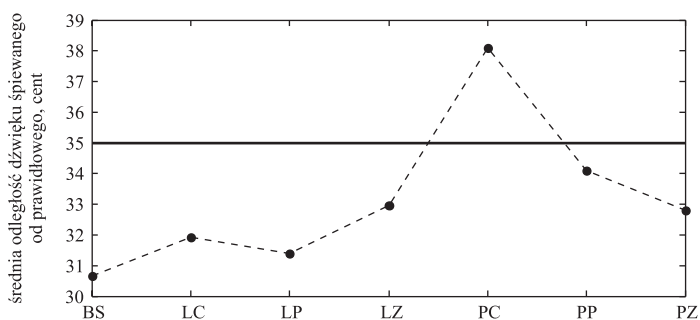


Rys. 8. Średnia odległość dźwięku śpiewanego od prawidłowego dźwięku – mężczyźni

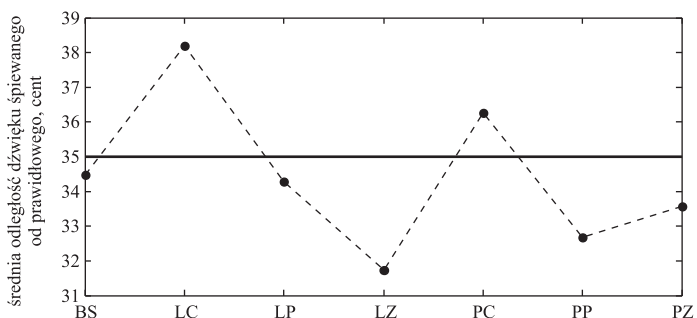
Najbardziej zaskakujące wnioski można sformułować, analizując parametry Jitter i średnią odległość od dźwięku oddzielnie dla osób lewo- i praworęcznych. Oczywiście prawo- i leworęczność nie oznacza jednoznacznie odpowiednio prawo- i lewouszności, ośrodek mowy zwykle znajduje się w lewej półkuli. Osoby praworęczne zwykle są prawouszne, a większość osób lewousznych jest leworęczna. Dlatego postawiona została hipoteza, że osobom praworęcznym najtrudniej będzie śpiewać z szumem w uchu prawym, a osobom leworęcznym odpowiednio z szumem w uchu lewym. Otrzymane wyniki przedstawiają wykresy na rysunkach 9–12.

Na wykresach przedstawionych na rysunkach 9 i 10 można zaobserwować bardzo ciekawą, ale i trudną do wytłumaczenia rzecz. Otrzymane wyniki są zupełnie odwrotne do spodziewanych. Osobom leworęcznym najtrudniej było śpiewać z szumem na prawym uchu, a osobom praworęcznym z szumem na lewym uchu. W przypadku osób leworęcznych różnica w średniej odległości od prawidłowego dźwięku dla śpiewania z szumem w uchu prawym i lewym wynosi niemal dziesięć centów. Oczywiście może to oznaczać, że przebadane osoby leworęczne były jednak prawouszne, niemniej jednak otrzymane wyniki są zaskakujące. Otrzymane wyniki znajdują również odwzorowanie

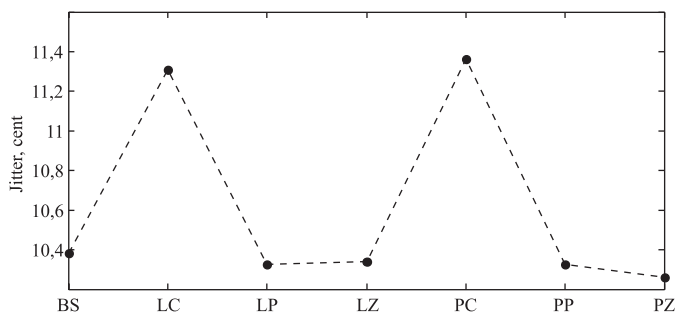
w wartościach parametru Jitter, przy czym dla tego parametru mniejsze znaczenie ma ucho, na które podawany jest szum. Można zatem sformułować wniosek, że szum podawany na dowolne ucho będzie powodował pogorszenie pewności i kontroli nad głosem.



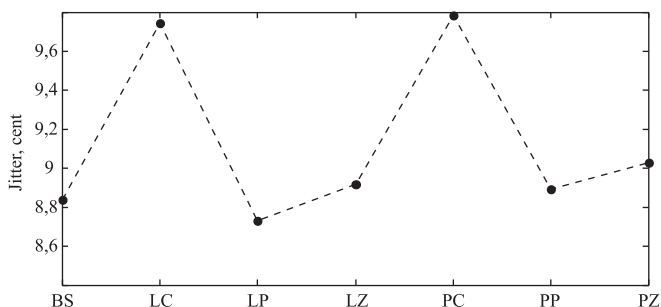
Rys. 9. Średnia odległość dźwięku śpiewanego od prawidłowego dźwięku – osoby leworęczne



Rys. 10. Średnia odległość dźwięku śpiewanego od prawidłowego dźwięku – osoby praworęczne



Rys. 11. Średnia wartość parametru Jitter – osoby praworęczne



Rys. 12. Średnia wartość parametru Jitter – osoby leworęczne

4. ANALIZA WIDMOWA

W celu kompletnego porównania różnic między sygnałami przeprowadzono również ich analizę widmową. W nagraniach słychać zauważalną zmianę barwy głosu po podaniu na któreś ucho zakłócenia w postaci szumu. Celem analizy było sprawdzenie, czy prawdziwa jest teza Tomatisa, że „głos zawiera tylko to, co usłyszy ucho”. Zgodnie z nią, podczas śpiewu „z szumem” barwa głosu powinna ulegać zmianie w paśmie, które ten szum obejmuje.

Na potrzeby analizy stworzono program, który po normalizacji energetycznej sygnałów według poniższych wzorów oblicza wartości różnic poziomów widma sygnału „bez szumu” oraz wszystkich kolejnych sygnałów „z szumem”.

Do przeprowadzenia normalizacji energetycznej sygnału zastosowano wzory:

- wzór na wartość skuteczną sygnału:

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N [x(n)]^2}$$

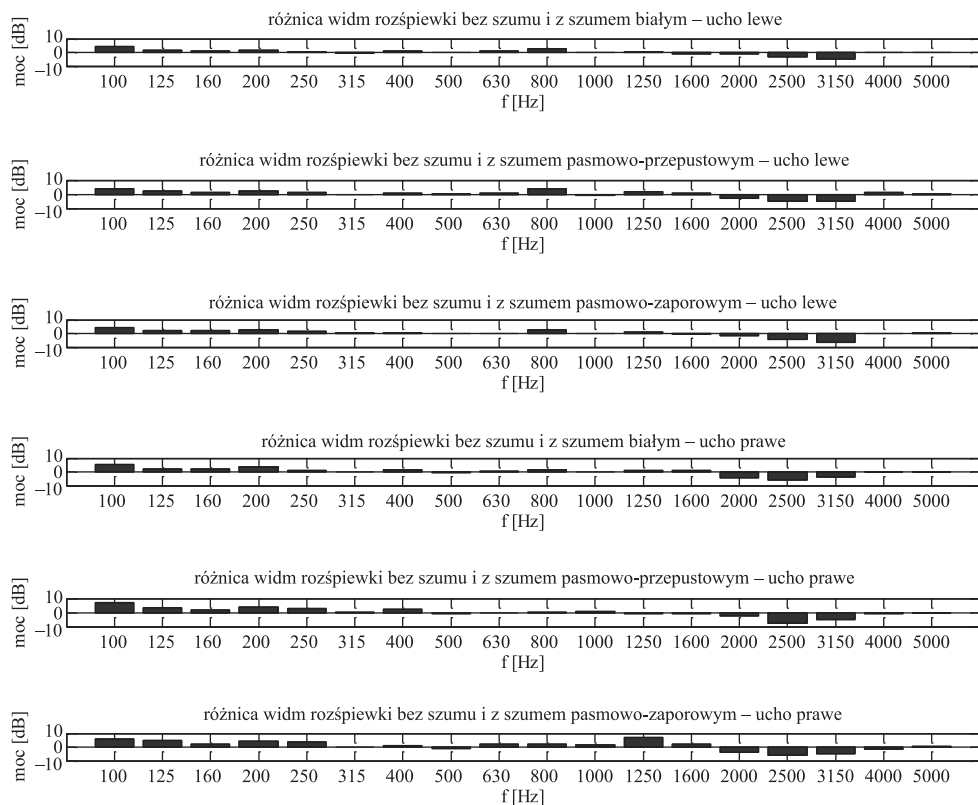
- wzór na normalizację energetyczną sygnału:

$$x(n) = \frac{x(n)}{x_{\text{RMS}}}$$

gdzie:

- N – liczba próbek sygnału,
- n – numery kolejnych próbek sygnału ($n = 1, 2, 3, \dots, N$),
- $x(n)$ – amplitudy kolejnych próbek sygnału.

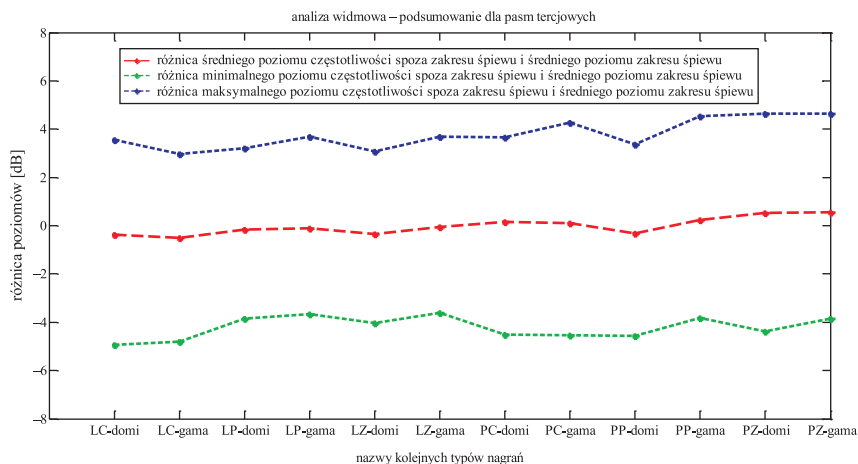
Następnie, po uśrednieniu wartości dla pasm tercjowych (przykład – rys. 13), program wyznacza dla otrzymanych widm różnicowych różnice: średniego, minimalnego i maksymalnego poziomu częstotliwości spoza zakresu śpiewu i średniego poziomu zakresu śpiewu.



Rys. 13. Przykładowe widma różnicowe – mężczyzna

W celu porównania analizie poddano również widma nagrań tego samego typu (np. z szumem pasmowo-przepustowym na uchu lewym), czyli widma powtórzeń melodii przez konkretną osobę. Różnice poziomów w poszczególnych pasmach dochodzą do 4 dB i są rozłożone w sposób losowy dla różnych osób badanych. Można więc założyć, że dopiero różnice powyżej tej wartości w badanym zakresie szumu można by traktować jako potwierdzenie hipotezy.

Po przeprowadzeniu analizy porównawczej dla wszystkich osób badanych (rys. 14) można stwierdzić, że podanie dowolnego szumu nie wpływa znacząco na widmo dźwięku w zakresie tego szumu. Średnia odległość poziomu widma różnicowego dla częstotliwości zakresu szumu od średniej wartości poziomu dla częstotliwości spoza zakresu oscyluje wokół zera – wyniki wszystkich badanych rozkładają się więc w sposób losowy i nie można zaobserwować żadnej tendencji dla badanych pasm częstotliwości. W przypadku każdego nagrania poziom badanego zakresu znajdował się pomiędzy minimum i maksimum poziomu widma spoza zakresu szumu – oznacza to, że różnice poziomów między sygnałem bez szumu a sygnałem z szumem bywały większe dla częstotliwości innych niż badane.



Rys. 14. Uśrednione wyniki analizy dla wszystkich badanych, dla kolejnych typów nagrań

Podsumowując, należy stwierdzić, że analiza widmowa nagrań nie wykazała wpływu zaburzenia słyszenia szumem na zmianę barwy głosu w zakresie częstotliwościowym tego szumu. Teoria Tomatisa nie znajduje więc potwierdzenia w tym przypadku. Prawdopodobnie dopiero dłuższa (bądź trwała) ekspozycja na taki szum mogłaby skutkować słyszalnymi zmianami w barwie głosu.

5. PODSUMOWANIE

Eksperyment pozwolił na częściowe potwierdzenie tez stawianych przez Alfreda Tomatisa. Rzeczywiście, „zaszumienie” któregoś z uszu powoduje pogorszenie kontroli nad głosem. Na podstawie otrzymanych wyników nie można jednak wskazać, które ucho jest istotniejsze w kontrolowaniu głosu. Nie udało się jednak wskazać różnic w śpiewie z różnymi rodzajami szumu. Trzeba jednak pamiętać, że ludzki mózg jest niezwykle skomplikowaną strukturą, a zatem nawet jeżeli badania nie potwierdzają jednoznacznie wszystkich tez, absolutnie nie można mówić o ich obaleniu czy kwestionować skuteczności terapii Tomatisa, co nigdy nie było celem opisanym w pracy badań.

LITERATURA

- [1] Ratyńska J., Borowska D., Drossel-Chilimoniuk E., Pindral J., Sikora E., Salamon-Żymelka M., Żywiec A., Haines T., Mularzuk M.: Metoda Tomatisa. Publikacja końcowa projektu „Uwaga! Sposób na sukces”, współfinansowanego przez UE w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
- [2] Granier J.P.: Tomatis Convention, 14–16.05.2016, Paris, Programmation: les dernières évolutions
- [3] Trischitta P.R., Varma E.L.: Jitter in Digital Transmission Systems. New York, 1989

**METODY
PROGNOZOWANIA WPŁYWU DRGAŃ
GENEROWANYCH
PRZEZ RUCH KOMUNIKACYJNY
NA HAŁAS W BUDYNKU**

The methods of predicting the impact of vibrations
caused by road traffic on the noise generated in buildings

**Krzysztof NOWOJOWSKI*, Agata SZELAĞ*,
Katarzyna BARUCH****

* Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Lądowej,
kkknnn@o2.pl

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
kbaruch@agh.edu.pl

STRESZCZENIE

Podczas eksploatacji budynków przebywające w nich osoby są narażone na drgania, m.in. przenoszone przez podłoże, w tym pochodzące od ruchu komunikacyjnego. Drgania te mogą wpływać destrukcyjnie na konstrukcję budynku i być uciążliwe dla przebywających w nim ludzi, jak również przyczynić się do wzrostu poziomu hałasu w pomieszczeniu wskutek promieniowania dźwięku przez drgające elementy budowlane. W pracach projektowych nad nowymi obiektami budowlanymi nie uwzględnia się analizy emisji hałasu spowodowanego transmisją dźwięków materiałowych. Autorzy zaproponowali zatem metodologię prognozowania, już na etapie projektowym, wpływu drgań pochodzących od ruchu komunikacyjnego na poziom hałasu powstającego w budynku. W pracy przedstawiono tę metodę oraz jej weryfikację na podstawowym układzie, jakim była pobudzona do drgań płyta żelbetowa utwierdzona na krawędziach bocznych. Analizę drgań i promieniowania dźwięku przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem dwóch programów numerycznych, tj. ANSYS i COMSOL Multiphysics. Ponadto część wyników była porównywana z rezultatami obliczeń analitycznych.

ABSTRACT

People staying in the buildings are exposed to vibrations transmitted through the ground that may occur as a result of communication traffic. These vibrations could interfere destructively to the building structure and be a nuisance for the people living in. On the other hand, they may also contribute to increasing the noise in the room due to the radiation of sound by vibrating construction elements. In the design work on new buildings the analysis of the noise pollution caused by the structure borne sound transmission is not taken into account. Therefore, the authors suggest a methodology to estimate the impact of vibrations from communication traffic on the noise emitted in the building. The paper presents this method and its verification on the primary system, which was the stimulated to vibrations reinforced concrete slab with clamped edges. The analysis of vibration and sound radiation was carried out by finite element method using two numerical programs, i.e. ANSYS and COMSOL Multiphysics. In addition, some results were compared with the results of analytical calculations.

1. WPROWADZENIE

Na etapie projektowania obiektów budowlanych wymagana jest analiza izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych i uderzeniowych dla przegród budowlanych i ich elementów pozwalająca na spełnienie wymagań normy PN-B-02151-3 [1]. Ponadto, w przypadku budynków znajdujących się w pobliżu linii tramwajowej, kolejowej, metra czy drogi o dużym natężeniu ruchu, analizuje się drgania wpływające na ich konstrukcję (PN-B-02170 [2]) oraz znajdujących się wewnątrz ludzi (PN-B-02171 [3]). W niektórych przypadkach może się jednak zdarzyć, że mimo spełnienia wszystkich warunków normowych oraz zapewnienia niskiego poziomu dźwięku pochodzącego od wewnętrznych urządzeń technicznych, hałas w projektowanych pomieszczeniach będzie przekroczony. Jedną z głównych przyczyn takiego zjawiska jest transmisja dźwięku drogą materiałową.

Drgania generowane przez komunikację zewnętrzną przenoszą się przez grunt na fundament budynku, a następnie na kolejne elementy konstrukcyjne. W konsekwencji wzbudzone do drgań duże płaszczyzny, m.in. ściany, stropy, promieniują znaczną ilość energii akustycznej do pomieszczeń. Działania zmierzające do ochrony przed nadmiernym hałasem wewnątrz budynku określone są w normie PN-B-02151-02 [4], w której dla danego typu pomieszczenia podano dopuszczalne wartości poziomu dźwięku. Jednakże, nie uwzględniając na etapie projektowania zagadnienia transmisji dźwięków drogą materiałową, wymagania tej normy mogą zostać niespełnione [5].

Zaproponowana w pracy metodologia prognozowania została przeprowadzona w dwóch środowiskach obliczeniowych (ANSYS i COMSOL) oraz zweryfikowana obliczeniami audytywnymi. Dzięki temu na każdym etapie badań można było weryfikować poprawność i zgodność wyników. Walidacja modelu była poparta również obliczeniami analitycznymi.

2. MODEL TEORETYCZNY PROMIENIOWANIA DŹWIĘKU PRZEZ DRGAJĄCĄ PRZEGRODĘ

Moc akustyczną wypromieniowaną przez drgającą przegrodę można obliczyć na podstawie następującej formuły [6]:

$$W = \langle \widetilde{v_{RMS}}^2 \rangle \rho_0 c_0 S \sigma \quad (1)$$

gdzie:

- $\langle \widetilde{v_{RMS}}^2 \rangle$ – prędkość średniokwadratowa drgań przegrody [m^2/s^2],
- ρ_0 – gęstość powietrza [kg/m^3],
- c_0 – prędkość dźwięku w powietrzu [m/s],
- S – pole powierzchni drgającej przegrody [m^2],
- σ – współczynnik promieniowania dźwięku [-].

Oprócz występujących we wzorze stałych materiałowych i pola powierzchni przegrody konieczne jest określenie powierzchniowej prędkości drgań przegrody przy danym wymuszeniu. Niestety w większości przypadków zagadnienie to nie ma rozwiązania analitycznego i wymaga przeprowadzenia obliczeń numerycznych.

Kolejną problematyczną kwestią jest określenie wartości współczynnika promieniowania dźwięku dla drgającej przegrody. Istnieją pewne wzory teoretyczne na ten współczynnik, ale są ograniczone do wąskiej grupy przypadków oraz zakładają znaczne uproszczenia modelu. W pracy przyjęto algorytm odpowiedni dla grubej płyty żelbetowej [7]. Uzależnia on wartość współczynnika promieniowania od częstotliwości granicznej f_b .

Częstotliwość graniczną f_b wyznaczyć można ze wzoru:

$$f_b = f_c + \frac{5c_0}{U} \quad (2)$$

gdzie:

U – obwód płyty [m],

c_0 – prędkość dźwięku w powietrzu [m/s],

f_c – częstotliwość koincydencji drgającej przegrody; $f_c = c_0^2 / 1,8 c_L h$ (c_L – prędkość fali podłużnej w płycie [m/s], h – grubość płyty [m]).

Dla częstotliwości f przekraczających znacznie częstotliwość graniczną f_b wartość współczynnika promieniowania dźwięku przyjmuje się równą jedności. W przypadku zaś częstotliwości równych lub mniejszych niż częstotliwość f_b współczynnik promieniowania oblicza się z następującej formuły:

$$\sigma = 0,45 \sqrt{\frac{Uf}{c_0}} \quad (3)$$

Znając moc akustyczną W wypromieniowaną z przegród ograniczających pewne pomieszczenie, można obliczyć poziom ciśnienia akustycznego L w tym wnętrzu:

$$L = 10 \log \frac{W}{W_0} - 10 \log \left[\frac{A}{4} \left(\frac{1}{m^2} \right) \right] \quad (4)$$

gdzie:

W_0 – moc odniesienia równa 10^{-12} W,

A – chłonność akustyczna pomieszczenia [m²].

3. PRZEDMIOT BADAŃ

Analizie poddano płytę żelbetową o następujących wymiarach i parametrach materiałowych:

$a = 5$ m (długość płyty),

$b = 3$ m (szerokość płyty),

$h = 0,2$ m (grubość płyty),

$\rho_z = 2500$ kg/m³ (gęstość objętościowa materiału),

$\nu = 0,2$ (współczynnik Poissona materiału),
 $E = 30$ GPa (współczynnik sprężystości materiału),
 $\xi = 0,02$ (ułamek tłumienia krytycznego materiału).

Na podstawie powyższych danych stworzono modele numeryczne w programach ANSYS i COMSOL Multiphysics. Przyjęto, że płyta jest utwierdzona na płaszczyznach bocznych. Siatkowanie dla bryły wykonano za pomocą elementów prostopadłościennych o wymiarach $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

4.1. ANALIZA MODALNA

Pierwszym etapem badań było wykonanie analizy modalnej rozpatrywanej płyty w celu wstępnego sprawdzenia zgodności wyników uzyskiwanych z obu programów numerycznych, tj. ANSYS i COMSOL Multiphysics. W tabeli 1 zestawiono uzyskane wartości sześciu pierwszych częstotliwości drgań własnych płyty przy zadanych warunkach brzegowych. Obliczono również różnicę bezwzględną między otrzymanymi wynikami.

Tabela 1

Częstotliwości drgań własnych f_i utwierdzonej płyty żelbetowej wyznaczone w programach ANSYS i COMSOL Multiphysics

Nr postaci drgań własnych	f_i [Hz] COMSOL Multiphysics	f_i [Hz] ANSYS	Różnica bezwzględna [Hz]
1	91,1	91,2	0,1
2	130,0	130,2	0,2
3	196,1	196,1	0,0
4	222,7	222,9	0,2
5	257,4	257,6	0,2
6	286,0	286,0	0,0

Różnice w wartościach częstotliwości drgań własnych, uzyskanych w obu programach, są nieznaczne. W celu dodatkowej weryfikacji otrzymanych rezultatów obliczono także pierwszą częstotliwość drgań własnych f_1 dla analizowanej płyty.

Częstotliwość f_1 wyznaczono ze wzoru empirycznego [8]:

$$f = \frac{\beta}{a^2} \sqrt{\frac{Eh^3}{12m(1-\nu^2)}} \quad (5)$$

gdzie:

E – współczynnik sprężystości materiału [Pa],

h – grubość płyty [m],

ν – współczynnik Poissona materiału,

m – masa powierzchniowa płyty [kg/m²],

a – długość płyty [m].

Parametr β określony jest zgodnie z zależnością:

$$\beta = 1,57 \sqrt{1 + 2,33\lambda^2 + 2,44\lambda^4} \quad (6)$$

gdzie λ oznacza stosunek długości płyty a [m] do jej szerokości b [m]; $\lambda = a / b$.

Ostatecznie otrzymano wartość pierwszej częstotliwości drgań przegrody równą 96,3 Hz, co daje zgodność z obliczeniami numerycznymi na poziomie około 5,5% (określoną na podstawie maksymalnej względnej różnicy między wynikami).

4.2. ANALIZA DRGAŃ PŁYTY

Warunki brzegowe i początkowe

Kolejnym etapem badań była analiza harmoniczna i czasowa drgań płyty poddanej wymuszeniu harmonicznemu. Drgania powierzchniowe o określonej prędkości zostały zadane na powierzchniach bocznych płyty w kierunku prostopadłym do powierzchni całej płyty. W tym celu konieczne było zwolnienie odpowiednich stopni swobody utwierdzonej płyty i wprowadzenie zadanych wartości prędkości. Przyjęcie takiego schematu odzwierciedla rzeczywiste przenoszenie drgań ze ścian na płytę stropową.

Amplituda i częstotliwość prędkości drgań zostały wyznaczone na podstawie rzeczywistego przebiegu wymuszenia w postaci przyspieszenia drgań, zarejestrowanego na fundamencie budynku podczas przejazdu taboru metra [9]. Na rysunku 1 przedstawiono zarejestrowany wykres przyspieszenia drgań na kierunku prostopadłym do powierzchni płyty.

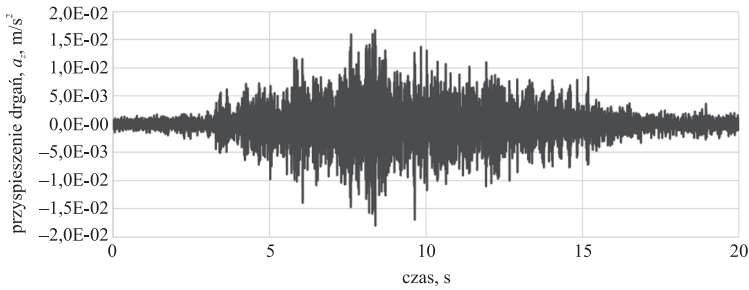
Czas trwania maksymalnej fazy drgań określono na podstawie funkcji Husida [10]:

$$f_H(t) = \int_0^t a_z^2(\tau) d\tau / \int_0^{t_k} a_z^2(\tau) d\tau \quad (7)$$

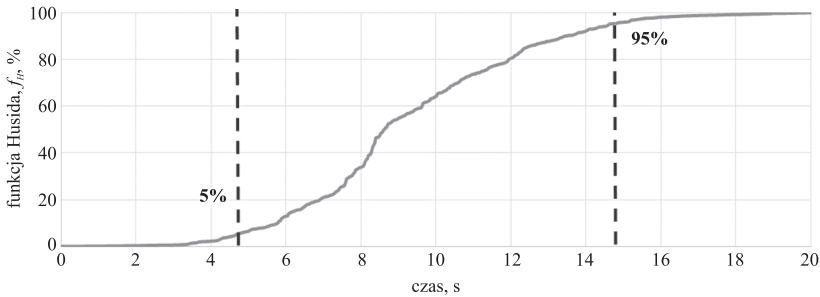
gdzie:

$a_z(\tau)$ – przyspieszenie na kierunku prostopadłym do powierzchni płyty w danym momencie [m/s²],

t_k – całkowity czas przebiegu zarejestrowanego przyspieszenia [s].



Rys. 1. Zarejestrowany przebieg przyspieszenia drgań na kierunku prostopadłym do powierzchni płyty, wywołanych przejazdem taboru metra

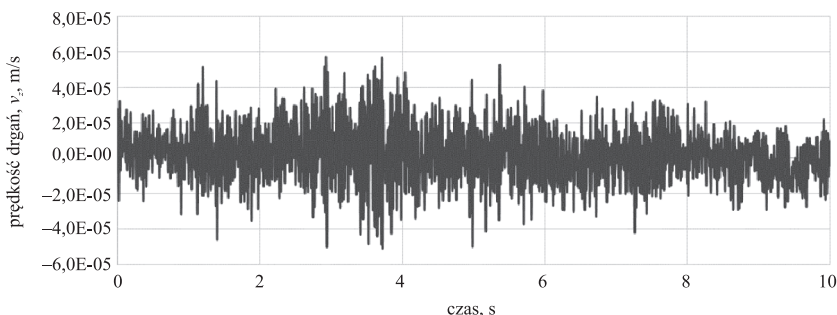


Rys. 2. Wykres funkcji Husida dla przebiegu przyspieszenia drgań w czasie z zaznaczeniem fazy intensywnej

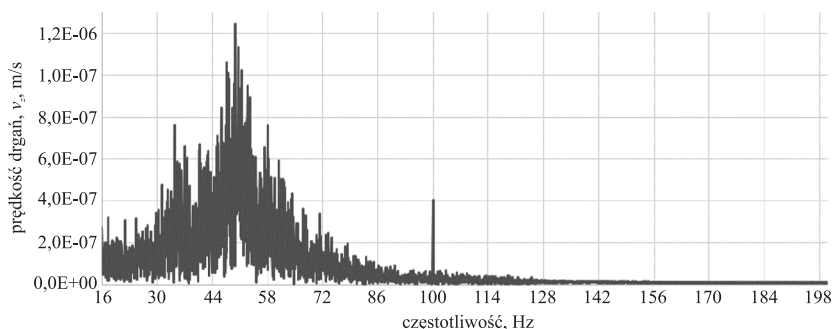
Jako czas intensywnych drgań przyjęto przedział między momentem, w którym $f_H(t)$ wynosiło 5%, a momentem, gdy $f_H(t) = 95\%$. Zakres ten odpowiadał chwili czasowej od $t_1 = 4,665$ s do $t_2 = 14,615$ s. W konsekwencji łączny czas drgań przyjętych jako intensywne wynosił $t_{tot} = 9,950$ s. Na rysunku 2 przedstawiono wykres funkcji Husida dla przebiegu przyspieszenia drgań w czasie z zaznaczeniem fazy intensywnej. Następnie, bazując na wyszczególnionym fragmencie przebiegu przyspieszenia drgań, określono

wykres prędkości drgań w czasie (rys. 3) oraz odpowiadające mu widmo amplitudowo-częstotliwościowe (rys. 4).

Analizując widmo prędkości drgań, można wyszczególnić częstotliwość 50 Hz jako tę, dla której drgania przyjmują maksymalną wartość. Równie charakterystyczna jest częstotliwość 100 Hz. Do dalszych badań, jako przykładowe wymuszenie harmoniczne, przyjęto częstotliwość 50 Hz i odpowiadającą jej amplitudę prędkości drgań $v_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ m/s.



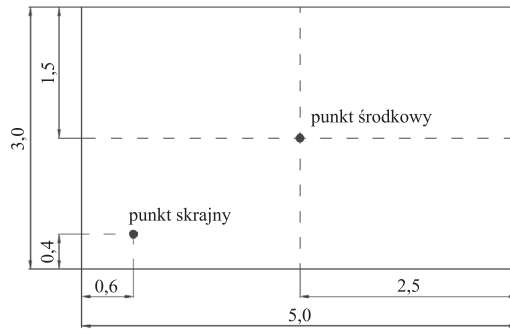
Rys. 3. Wykres prędkości drgań wymuszenia na kierunku prostopadłym do powierzchni płyty, dla intensywnej fazy drgań



Rys. 4. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe dla przebiegu prędkości drgań wymuszenia

Analiza harmoniczna i czasowa

W programach ANSYS i COMSOL Multiphysics przeprowadzono dwie analizy drgań płyty przy zadanych warunkach początkowych i brzegowych. Były to analiza harmoniczna i analiza czasowa. W celu porównania uzyskanych wyników wyszczególniono dwa charakterystyczne punkty na powierzchni płyty, tj. punkt środkowy oraz punkt skrajny, znajdujące się w odległości 0,4 m i 0,6 m od krawędzi płyty, zgodnie z rysunkiem 5. Wyniki analiz oceniano również w przypadku uśrednionych wartości z całej powierzchni płyty.



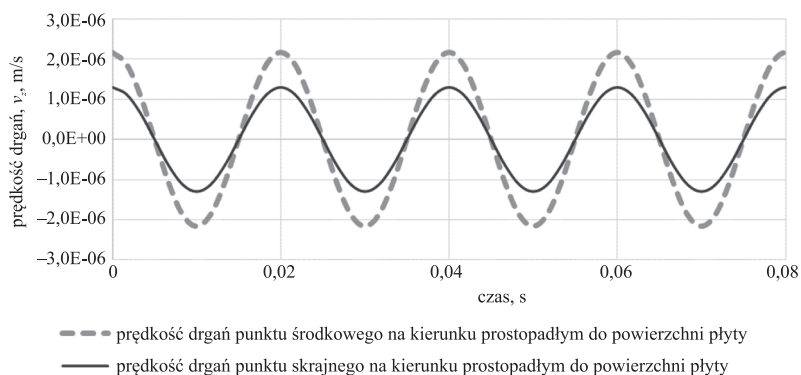
Rys. 5. Rozmieszczenie punktów charakterystycznych na powierzchni płyty (wymiary w metrach)

Porównywaną wielkością była prędkość średniokwadratowa $\langle \widetilde{v_{RMS}}^2 \rangle$. Zestawienie wyników analiz harmonicznej i czasowej przeprowadzonych w rozpatrywanych programach przedstawiono w tabeli 2. Ponadto na rysunkach 6 i 7 pokazano fragmenty przebiegów czasowych prędkości drgań dla punktów charakterystycznych, odpowiednio uzyskanych z obliczeń w programie ANSYS i COMSOL Multiphysics. Na podstawie obliczonych maksymalnych różnic względnych między otrzymanymi wynikami można stwierdzić dużą zbieżność rezultatów obliczeń w obu programach.

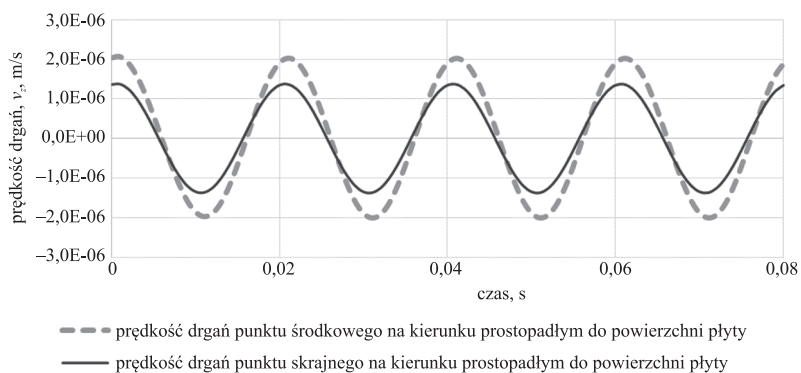
Tabela 2

Wartości prędkości średniokwadratowej drgań całej płyty i punktów charakterystycznych uzyskane z poszczególnych analiz i programów numerycznych

Program	Rodzaj analizy	Analizowany element	$\langle \widetilde{v_{RMS}}^2 \rangle$ [m ² /s ²]
COMSOL Multiphysics	harmoniczna	punkt skrajny	$9,79 \cdot 10^{-12}$
		punkt środkowy	$2,23 \cdot 10^{-12}$
		cała powierzchnia	$1,20 \cdot 10^{-12}$
	czasowa	punkt skrajny	$9,65 \cdot 10^{-12}$
		punkt środkowy	$2,26 \cdot 10^{-12}$
		cała powierzchnia	$1,13 \cdot 10^{-12}$
ANSYS	harmoniczna	punkt skrajny	$8,50 \cdot 10^{-12}$
		punkt środkowy	$2,22 \cdot 10^{-12}$
		cała powierzchnia	$1,17 \cdot 10^{-12}$
	czasowa	punkt skrajny	$8,52 \cdot 10^{-12}$
		punkt środkowy	$2,36 \cdot 10^{-12}$
		cała powierzchnia	$1,20 \cdot 10^{-12}$
Maksymalne różnice względne między wynikami		punkt skrajny	15%
		punkt środkowy	6%
		cała powierzchnia	6%



Rys. 6. Fragment przebiegu czasowego prędkości drgań dla punktów charakterystycznych przy zadanym wymuszeniu, wyniki uzyskane na podstawie analizy w programie ANSYS



Rys. 7. Fragment przebiegu czasowego prędkości drgań dla punktów charakterystycznych przy zadanym wymuszeniu, wyniki uzyskane na podstawie analizy w programie COMSOL Multiphysics

4.3. POZIOM CIŚNIENIA AKUSTYCZNEGO PROMIENIOWANEGO PRZEZ DRGAJĄCĄ PŁYTĘ

Na podstawie uzyskanych wartości prędkości średniokwadratowej drgań całej płyty, zgodnie z wzorem (1), można wyznaczyć moc akustyczną promieniowaną przez płytę. W tym celu konieczne jest określenie współczynnika promieniowania dźwięku. Posłużono się formułą (3). Przyjęto prędkość fali dźwiękowej w powietrzu $c_0 = 343$ m/s. Obwód płyty U wyniósł 16 m. Częstotliwość koincydencji obliczono, opierając się na założeniu, że prędkość fali podłużnej c_L w materiale wynosi:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_z(1-\nu^2)}} = \sqrt{\frac{30 \text{ GPa}}{2500 \text{ kg/m}^3 \cdot (1-0,2^2)}} = 3536 \text{ m/s} \quad (8)$$

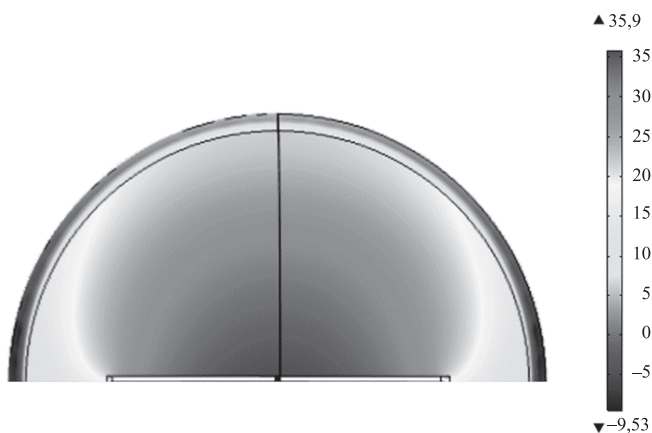
W konsekwencji otrzymano wartość częstotliwości koincydencji $f_c = 92,4$ Hz, a częstotliwość graniczną $f_b = 199,6$ Hz. Dla analizowanej częstotliwości drgań $f = 50$ Hz współczynnik promieniowania dźwięku σ wynosi 0,69. Ostatecznie obliczono moc akustyczną promieniowaną przez płytę, a uzyskane wyniki, dla poszczególnych analiz i programów numerycznych, zestawiono w tabeli 3. Różnice między otrzymanymi rezultatami są niewielkie i wynoszą maksymalnie 0,3 dB.

Tabela 3

Poziom mocy akustycznej promieniowanej przez drgającą płytę dla zadanego wymuszenia harmonicznego

Program	Rodzaj analizy	Poziom mocy akustycznej, $10 \log \frac{W}{W_0}$ [dB]
COMSOL Multiphysics	harmoniczna	37,1
	czasowa	36,8
ANSYS	harmoniczna	37,0
	czasowa	37,1

Kolejnym krokiem analizy było określenie za pomocą metody elementów skończonych poziomu mocy akustycznej promieniowanej przez rozpatrywaną drgającą płytę. Skorzystano z programu COMSOL Multiphysics. Obliczenia przeprowadzono tylko dla przypadku analizy harmonicznego. Warunki początkowe i brzegowe nie uległy zmianie w stosunku do wcześniejszych symulacji. Przyjęto promieniowanie dźwięku tylko przez jedną płaszczyznę płyty. Na rysunku 8 przedstawiono rozkład ciśnienia akustycznego w obszarze drgającej płyty. Ostatecznie uzyskano wartość mocy akustycznej równą 37,0 dB, co daje różnicę 0,1 dB w stosunku do mocy określonej na podstawie wzorów teoretycznych.



Rys. 8. Rozkład ciśnienia akustycznego w obszarze drgającej płyty

5. WNIOSKI

W rozdziale przedstawiono metodę prognozowania wpływu drgań na hałas promieniowany do wnętrza budynku. Wykonano obliczenia dla uproszczonego układu w dwóch programach numerycznych. Podwójne obliczenia miały na celu wyeliminowanie potencjalnych błędów wynikających z samych obliczeń numerycznych, w tym m.in. przyjętych w programach założeń i algorytmów. Część wyników porównano również z rezultatami obliczeń analitycznych.

Wyniki przeprowadzonych w obu programach numerycznych analiz wykazały bardzo dobrą zgodność, były też zbieżne z rezultatami obliczeń analitycznych. Różnica bezwzględna pomiędzy sześcioma pierwszymi częstotliwościami drgań własnych analizowanej płyty wyniosła co najwyżej 0,2 Hz. Maksymalna różnica względna pomiędzy wartościami prędkości średniokwadratowej drgań dla powierzchni płyty była równa 6%, co bezpośrednio przekłada się na różnicę pomiędzy obliczonymi poziomami mocy akustycznej wynoszącą 0,3 dB. Porównując wyznaczone analitycznie wartości poziomu mocy akustycznej promieniowanej przez płytę z wartością określoną za pomocą metody elementów skończonych, również uzyskano niewielką rozbieżność równą 0,1 dB.

Zaproponowana i zweryfikowana przez autorów metodologia prognozowania wpływu drgań generowanych przez ruch komunikacyjny na poziom hałasu powstającego w budynku jest narzędziem umożliwiającym rozwiązanie problemu emisji hałasu spowodowanego transmisją dźwięków materiałowych. Rozwijając tę metodę, będzie można, już na etapie projektowym, przewidzieć hałas emitowany przez pobudzone do drgań przegrody budowlane.

LITERATURA

- [1] PN-B-02151-3:2015-10 – Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych
- [2] PN-B-02170:1985 – Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłogę na budynki.
- [3] PN-B-02171:1988 – Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach
- [4] PN-B-02151-02:1987 – Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach – Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach
- [5] Szelağ A., Stypuła K., Kamisiński T.: Sound Radiation by Vibrating Building Partitions in Terms of Acceptable Vibration Values, *Acta Physica Polonica A*, 2014, 125, 122–126
- [6] Osama A.B. Hassan: *Building Acoustics and Vibration, Theory and Practice*, Singapore 2009
- [7] Beranek L.L., Ve`r, I.S.: *Noise and Vibration Control Engineering*, New York 1992
- [8] Arcelor Mittal: *Drgania Stropów. Poradnik Projektanta*

- [9] Przebieg drgań od taboru metra zmierzonych na budynku na poziomie gruntu – dane udostępnione przez Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki
- [10] Trifunac M.D., Brady A.G.: A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, The Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA), 1975, 65, 581–626

WYKORZYSTANIE
WARSTWOWYCH TWORZYW DRZEWNYCH
W KONSTRUKCJI MEBLI
O WŁAŚCIWOŚCIACH DŹWIĘKOCHŁONNYCH

Multilayer sound absorption wood panels
in furniture design

Marlena WOJNOWSKA

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu,
Wydział Technologii Drewna,
marlena.wojnowska@up.poznan.pl

STRESZCZENIE

Meble są istotnymi elementami pochłaniania dźwięku w pomieszczeniach. Znaczący wpływ na skuteczność tego zjawiska ma struktura ich powierzchni.

Celem pracy było określenie właściwości akustycznych pomieszczenia w funkcji współczynnika pochłaniania dźwięku materiału, z którego wykonano meble. W szczególności celem poznawczym pracy było określenie wpływu współczynnika pochłaniania dźwięku płyt drewnopochodnych, z których zamodelowano meble, na czas pogłosu w pomieszczeniu o małej objętości.

Właściwości akustyczne pomieszczenia określono metodą pomiarową i numeryczną. W tym celu do symulacji warunków akustycznych pomieszczenia wybrano program komputerowy CATT-Acoustic. Wykazano, że perforowane płyty meblowe zwiększają dźwiękochłonność pomieszczenia i obniżają czas pogłosu.

Praca stanowiła jedno z zadań projektu pt. „Pasywne akustycznie materiały do produkcji mebli”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju i realizowanego przez Katedrę Meblarstwa Wydziału Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz Katedrę Mechaniki i Wibroakustyki Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

ABSTRACT

Furniture are important elements of sound absorption in the room. Their surface has a significant impact on the acoustic properties.

The aim of the study was to determine the acoustic properties of the room as function of sound absorption coefficient of the material from which the furniture were made. In particular, the cognitive purpose of the study was to determine the impact of sound absorption coefficient wood panels from which the furniture were made on the reverberation time in room with a small volume.

The acoustic properties of the room were determined by measurement and by numerical calculations. In order to simulate the acoustics of the room the computer software CATT-Acoustic has been used. It has been shown that perforated furniture boards enhance sound absorption and reduce reverberation time.

The work was one of the tasks of the project “Passive acoustic materials for furniture production” funded by NCBiR and implemented by the Department of Furniture WTD UP in Poznan and the Department of Mechanics and Vibroacoustics AGH in Krakow.

1. WSTĘP

Wzrost energii akustycznej w pomieszczeniach biurowych uzasadnia potrzebę innowacyjnego projektowania zorientowanego na zmianę akustyki wnętrz, wykorzystującego ocenę wpływu wyposażenia wnętrz na planowane przeznaczenie pomieszczenia. Meble mają istotny wpływ na pochłanianie dźwięku w pomieszczeniach, zwłaszcza gdy wypełniają je w znacznym stopniu. Jak powszechnie wiadomo, drewno i tworzywa drzewne są najczęściej stosowanymi surowcami do produkcji mebli. Dążenie do redukcji głośności niepożądanych dźwięków w otoczeniu oraz dynamicznie rozwijający się przemysł

meblarski pozwoliły na opracowanie nowych materiałów stosowanych do budowy mebli, o pożądanych cechach akustycznych.

W nowoczesnej architekturze bardzo często dominują gładkie, twarde powierzchnie ze szkła, kamienia lub betonu. Takie wnętrza charakteryzuje niska chłonność akustyczna, ponieważ materiały o gładkich powierzchniach i niewielkim zróżnicowaniu geometrycznym przy różnej gęstości nieznacznie wpływają na zmianę czasu pogłosu. W celu poprawienia akustyki wspomnianej przestrzeni należy zwrócić uwagę na elementy wypełnienia i strukturę ich powierzchni. Istotne jest, aby materiał konstrukcyjny nie odbijał dźwięku padającego na jego powierzchnię, a fale akustyczne zostały wprowadzone do wnętrza struktury i tam pochłonięte lub rozproszone.

Niezbyt dużą dźwiękochłonność drewna podwyższa się, wykonując płyty z rozwłóknionego drewna, wełny drzewnej, wiórów czy trocin, przez co są bardziej porowate i dźwiękochłonne. Włókna drzewne w porównaniu z włóknami mineralnymi czy szklanymi są krótsze, szersze i bardziej prostokątne, od czego istotnie zależy prędkość rozchodzenia się dźwięku w materiale oraz impedancja akustyczna. W celu dalszego podwyższania współczynnika pochłaniania dźwięku powierzchnię płyty pokrywa się regularną siecią otworów (perforacja). Podczas wytwarzania tworzyw drzewnych eliminuje się niekorzystne cechy drewna litego wynikające z budowy anizotropowej, higroskopijności oraz występujących wad. Otrzymany materiał jest bardziej jednorodny, a jego właściwości (w tym akustyczne) można dostosowywać do wymagań wynikających z przeznaczenia.

Biorąc powyższe pod uwagę, materiały drewnopochodne mogą być dobrymi materiałami wykorzystywanymi w projektowaniu mebli, drzwi, ścian, podłóg, sufitów, a także specjalnie skonstruowanych dyfuzorów i absorberów. Stopień wypełnienia przestrzeni wnętrza meblami jest znaczący, zatem wykonanie ich z odpowiednich tworzyw drzewnych istotnie wpływa na tłumienie dźwięku w pomieszczeniu.

Celem pracy było określenie właściwości akustycznych pomieszczenia biurowego o małej kubaturze w zależności od rodzaju materiału, z którego wykonano do niego meble. W szczególności celem poznawczym pracy było określenie wpływu współczynnika pochłaniania dźwięku płyt drewnopochodnych, z których zamodelowano meble biurowe, na czas pogłosu w pomieszczeniu o kubaturze 50 m³.

2. WŁAŚCIWOŚCI DŹWIĘKOCHŁONNE TWORZYW DRZEWNYCH

Właściwości akustyczne tworzyw drzewnych, podobnie jak drewna, decydują o możliwościach zastosowania ich jako materiału rezonansowego i dźwiękochłonnego. Jak podaje Krzysik [1], istotną rolę w tej dziedzinie odgrywają:

- prędkość rozchodzenia się dźwięku,
- oporność akustyczna,
- tłumienie dźwięku.

Niestety w literaturze próżno szukać wyników badań tworzyw drzewnych przydatnych do projektowania mebli pasywnych akustycznie. Dostępne są jedynie badania dotyczące kompozytów wytworzonych z materiałów włóknistych przeznaczonych dla budownictwa. Nie zostały one jednak dopuszczone do produkcji mebli. Dopiero badania przeprowadzone w Katedrze Meblarstwa Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu i Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie uwzględniły te zagadnienia. Właściwości akustyczne tworzyw drzewnych określono przez znormalizowane impedancje akustyczne oraz współczynniki pochłaniania dźwięku. W pracy pod redakcją Smardzewskiego i Kamisińskiego [2] przedstawiono niektóre wyniki wyżej wymienionych badań. Na podstawie ich analizy można stwierdzić, że:

- wysokie wartości współczynnika pochłaniania dźwięku zależą od niskich gęstości materiałów na powierzchni płyt, a ich wartość rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości,
- płyty kanałowe DendroLight wykazują niską porowatość i wysoką impedancję charakterystyczną,
- najniższą impedancję charakterystyczną i znormalizowaną wykazują wiórowe płyty kanałowe, rdzenie płyt DendroLight oraz purenit,
- najwyższe zdolności pochłaniania dźwięku dla częstotliwości od 125 Hz do 500 Hz wykazują tworzywa drzewne o niskiej gęstości warstw powierzchniowych i wysokiej porowatości,
- płyty komórkowe z papierowym rdzeniem lepiej absorbują dźwięk w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 2 kHz,
- najkorzystniejsze właściwości akustyczne dla częstotliwości 4 kHz mają płyty o dużych nierównościach na powierzchni zewnętrznej.

3. METODYKA I MATERIAŁY

3.1. WYBÓR MATERIAŁÓW

I SYSTEMATYKA ICH WŁAŚCIWOŚCI AKUSTYCZNYCH

W pracy do badań numerycznych i pomiarowych wykorzystano wielowarstwowe kompozyty kilku rodzajów. Ich właściwości fizyczno-mechaniczne określono w laboratoriach Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Celem tych badań było wyznaczenie współczynnika pochłaniania dźwięku przez komponenty perforowanych płyt meblowych. Materiał badawczy miał wykazywać praktyczne zastosowanie komponentów w produkcji mebli skrzyniowych.

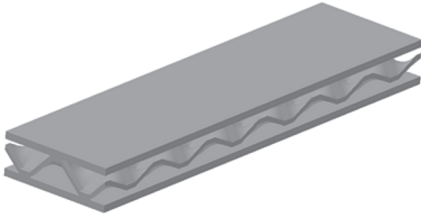
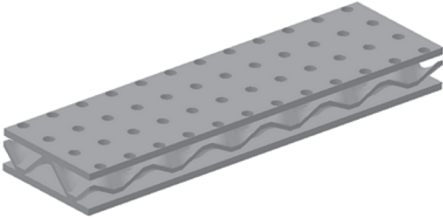
Arkusze wybranych płyt poddano sezonowaniu w warunkach laboratoryjnych przy wilgotności względnej powietrza 65% i temperaturze około 20°C, aż do uzyskania stałej masy. Badania rozpoczęto od określenia fizyczno-mechanicznych właściwości tworzyw drzewnych, takich jak: gęstość, wilgotność, wytrzymałość na zginanie statyczne oraz moduł

sprężystości liniowej [3, 4]. Następnym etapem prowadzonych badań było obliczenie porowatości, oporności przepływu powietrza oraz impedancji charakterystycznej. W końcowym etapie określono znormalizowaną impedancję akustyczną na powierzchni próbek oraz współczynnik pochłaniania dźwięku. Wykorzystano do tego metodę funkcji przejścia [5].

Po przeanalizowaniu danych do dalszych obliczeń komputerowych i pomiarów wybrano jeden wariant płyty bez perforacji – 3HSiH oraz jeden wariant płyty z jednostronną perforacją – 3HSiHo. Wybór przedstawionych w tabeli 1 materiałów był podyktowany ich obiecującymi właściwościami, dzięki którym wytworzone z nich meble skrzyniowe mogłyby zarówno pełnić funkcje konstrukcyjne, jak i pochłaniać dźwięki. Płyty te wykonano w całości w technologii HDF i z falistym rdzeniem. Charakteryzują się one otwartymi komorami w warstwie wewnętrznej, gromadzącymi dużą objętość powietrza, co znacznie różni te płyty od pozostałych tworzyw drzewnych.

Tabela 1

Zestawienie wariantów próbek wielowarstwowego kompozytu (według [2])

Wariant	Opis
3HSiH 	Okładzina: HDF 3 mm Rdzeń: C12_2 Okładzina: HDF 3 mm
3HSiHo 	Okładzina: HDF 3 mm Rdzeń: C12_2 Okładzina: HDF 3 mm, perforacja okrągła 14/5 mm

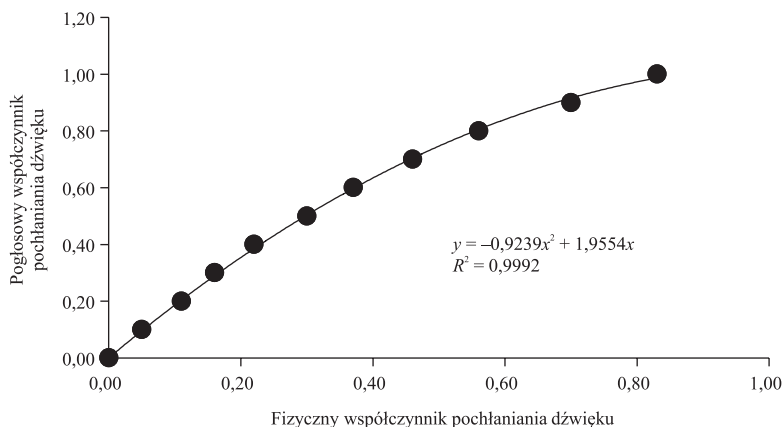
Na potrzeby pracy w badaniach określono średnie wartości współczynnika pochłaniania dźwięku, które podano w tabeli 2.

Na podstawie danych z tabeli 2 i wykresu na rysunku 1, przedstawiającego przybliżoną zależność pomiędzy fizycznym współczynnikiem pochłaniania dźwięku α_f a pogłosowym współczynnikiem pochłaniania dźwięku α_g , obliczono wartości pogłosowe dla uwzględnianych w modelowaniu materiałów, co przedstawia tabela 3.

Tabela 2

Zestawienie średnich wyników pomiarów fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku wielowarstwowego kompozytu (według [2])

Rodzaj materiału	Współczynnik pochłaniania dźwięku α_f						
	pasmo częstotliwości f [Hz]						średnia
	125	250	500	1000	2000	4000	
3HSiH	0,07	0,26	0,26	0,17	0,10	0,07	0,16
3HSiHo	0,02	0,12	0,24	0,36	0,45	0,70	0,32



Rys. 1. Wykres zależności pomiędzy fizycznym a pogłosowym współczynnikiem pochłaniania dźwięku [2]

Tabela 3

Zestawienie średnich wyników obliczeń pogłosowego współczynnika pochłaniania dźwięku wielowarstwowego kompozytu (według [2])

Rodzaj materiału	Współczynnik pochłaniania dźwięku α_s						
	pasmo częstotliwości f [Hz]						średnia
	125	250	500	1000	2000	4000	
3HSiH	0,13	0,45	0,45	0,31	0,19	0,13	0,28
3HSiHo	0,04	0,22	0,42	0,58	0,69	0,92	0,48
Płyta wiórowa trzywarstwowa	0,08	0,11	0,11	0,19	0,24	0,24	0,17

3.2. WYBÓR POMIESZCZENIA REFERENCYJNEGO DO BADAŃ AKUSTYCZNYCH

Do badań wybrano pomieszczenie biurowe (sekretariat) znajdujące się w budynku Wydziału Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Na wybór tego pomieszczenia miał wpływ jego charakter użytkowy, a także to, że z uwagi na zauważalną modułowość pomieszczeń i powtarzalność ich aranżacji sekretariat można uznać za referencyjne wnętrze biurowe. Nie bez znaczenia był również dogodny dostęp do pomieszczenia i sprzyjające warunki do sporządzenia dokumentacji wymiarowej i fotograficznej oraz przeprowadzenia badań i pomiarów.

Wybrane pomieszczenie ma następujące wymiary: długość – 5,6 m, szerokość – 2,8 m, wysokość – 3,2 m. Na wyposażenie sekretariatu składają się klasyczne meble biurowe (regał, szafy, biurko, pomocnik, stół, trzy fotele). Meble twarde wykonano z laminowanej trzywarstwowej płyty wiórowej (rys. 2).



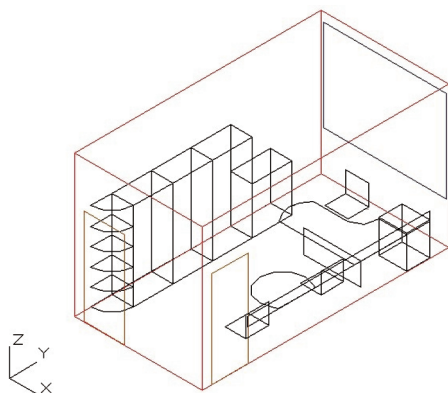
Rys. 2. Widok pomieszczenia od strony sali seminaryjnej

3.3. BUDOWA MODELU KOMPUTEROWEGO W ŚRODOWISKU CATT-ACOUSTIC

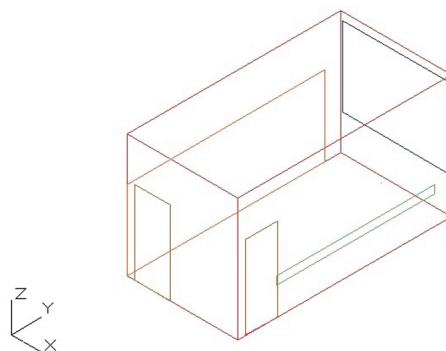
Do przeprowadzenia symulacji warunków akustycznych sekretariatu posłużył program komputerowy CATT-Acoustic (Computer Aided Theatre Technique). Program ten pozwala przeprowadzić podstawowe etapy modelowania akustyki wnętrz, począwszy od przeniesienia geometrii wnętrza do modelu komputerowego, przez wprowadzenie parametrów akustycznych materiałów wykończeniowych z biblioteki programu, skończywszy na przeprowadzeniu symulacji parametrów akustycznych pomieszczenia.

Etapem wstępnym do modelowania numerycznego w programie CATT-Acoustic było wykonanie dokładnych pomiarów pomieszczenia.

Na tej podstawie w programie AutoCAD stworzono modele krawędziowe sekretariatu z meblami i panelem, które przedstawiają rysunki 3 i 4.



Rys. 3. Model krawędziowy pomieszczenia z meblami



Rys. 4. Model krawędziowy pomieszczenia z panelem (3HSiH, 3HSiHo)

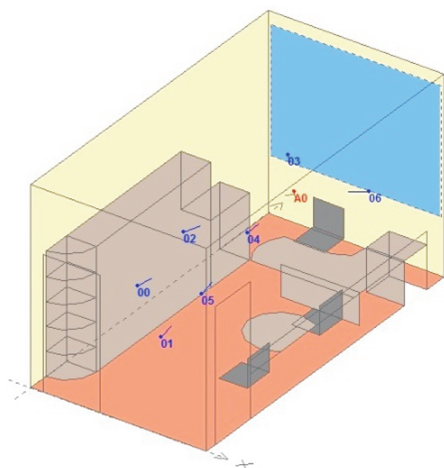
Odwzorowanie pomieszczenia w modelu 3D służyło określeniu położenia początku przestrzennego kartezjańskiego układu współrzędnych.

Wyznaczone w programie AutoCAD współrzędne kartezjańskie wszystkich elementów wprowadzono do sekcji CATT-Edit, tworząc w ten sposób model krawędziowy pomieszczenia.

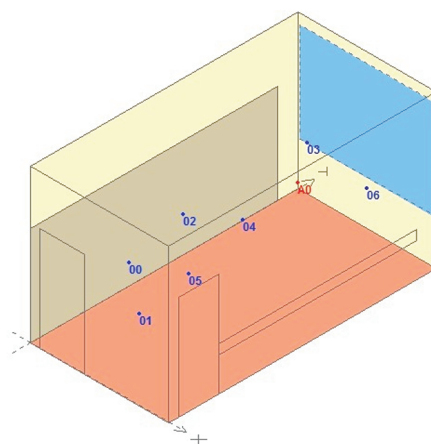
Kolejnym etapem było określenie środowiska akustycznego sekretariatu oraz podanie trzech podstawowych parametrów: temperatury – 20°C, wilgotności – 50%, gęstości powietrza – 1,2 kg/m³. Następnie wszystkim materiałom przypisano ich właściwości akustyczne przez wprowadzenie pogłosowych współczynników pochłaniania dźwięku (rys. 5, rys. 6). Następnie zdefiniowano położenie głośnika (oznaczonego na rysunkach symbolem A0) i siedmiu mikrofonów (oznaczonych na rysunkach symbolami: 00–06).

Charakterystyka źródła dźwięku była jednakowa we wszystkich kierunkach. Poziom ciśnienia akustycznego generowanego przez źródło dźwięku był mierzony w odległości 1 m na osi głównej promieniowania. Do obliczeń zdefiniowano wszechkierunkowe źródło dźwięku generujące szum różowy ważony krzywą korekcyjną A o poziomie 70 dB dla 1 kHz na osi źródła w odległości 1 m.

Symulacje numeryczne przeprowadzono dla dwóch wariantów wypełnienia pomieszczenia. W pierwszym uwzględniono oryginalną geometrię mebli, dla których zastosowano różne materiały konstrukcyjne (rys. 5, tab. 4). W drugim zastąpiono meble panelem o powierzchni 10 m² (rys. 6), dla którego zastosowano te same materiały. Wybrane opcje uwzględnione w modelowaniu numerycznym zweryfikowano pomiarowo.



Rys. 5. Model pomieszczenia z meblami w programie CATT-Acoustic



Rys. 6. Model pomieszczenia z panelem (3HSiH, 3HSiHo) w programie CATT-Acoustic po przypisaniu materiałom właściwości akustycznych

Tabela 4

Zestawienie materiałów użytych w modelowaniu w poszczególnych wariantach

Wariant	Materiał zastosowany do modelowania
01	plyta bez perforacji (3HSiH)
02	plyta jednostronnie perforowana (3HSiHo)
03	plyta wiórowa trzywarstwowa (materiał referencyjny)

3.4. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA BADAŃ METODĄ POMIAROWĄ

Do przeprowadzenia badań czasu pogłosu w sekretariacie metodą pomiarową wykorzystano oprogramowanie DASyLab (Data Acquisition System Laboratory), do którego podłączono dwa mikrofony ROGA RG-50. Układ konwersji analogowo-cyfrowej zapewnił dwukanałowy moduł akwizycji danych VIBdaq. Pierwszy pomiar czasu pogłosu w sekretariacie przeprowadzono po uprzednim usunięciu wszystkich mebli stanowiących jego wyposażenie. Do drugiego pomiaru zbudowano panel z płyt bez perforacji o falistym rdzeniu (3HSiH), którego powierzchnia wynosiła 10 m². Trzeci pomiar wymagał zbudowania panelu o powierzchni 10 m² z płyt jednostronnie perforowanych (3HSiHo), o falistym rdzeniu. Czwarty pomiar przeprowadzono po ponownym wniesieniu wszystkich mebli stanowiących pierwotne wyposażenie sekretariatu.

3.5. SPOSÓB PORÓWNANIA OTRZYMANYCH WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań otrzymane metodą numeryczną przedstawiono w dwóch częściach. W pierwszej zestawiono średnie wartości czasu pogłosu w pomieszczeniu referencyjnym wypełnionym meblami, otrzymane metodą geometryczną. Czynnikiem zmiennym w tych obliczeniach numerycznych był pogłosowy współczynnik pochłaniania dźwięku materiałów, z których wykonano meble, odpowiednio dla płyty bez perforacji, płyty z perforacją jednostronną oraz płyty wiórowej trzywarstwowej jako materiału referencyjnego.

Druą część jest zestawieniem średnich wartości czasu pogłosu w pomieszczeniu referencyjnym z panelem o powierzchni 10 m², otrzymanych metodą geometryczną. Zmiennymi były współczynniki pochłaniania dźwięku materiałów, z których zamodelowano panele. Odpowiednio dla płyty bez perforacji, płyty z perforacją jednostronną, płyty trzywarstwowej.

Do porównania wyników symulacji prowadzonych metodą geometryczną dla pomieszczenia o kubaturze bliskiej 50 m³ stosuje się wartości czasu pogłosu dla częstotliwości powyżej 1 kHz. Wynika to z tzw. częstotliwości Schroedera [6], określającej granicę możliwości zastosowania metod geometrycznych w zależności od kubatury analizowanego pomieszczenia. Porównanie wyników czasu pogłosu w pomieszczeniu referencyjnym otrzymanych metodą numeryczną z wynikami otrzymanymi metodą pomiarową przeprowadzono dla częstotliwości 500 Hz.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

4.1. ANALIZA CZASU POGŁOSU USTALONEGO METODĄ NUMERYCZNĄ

Przeprowadzone pomiary pozwoliły na analizę podstawowego parametru, jakim był czas pogłosu, czyli czas, w którym poziom ciśnienia akustycznego od momentu wyłączenia jego źródła ulega redukcji o 60 dB.

W tabeli 5 przedstawiono średnie wartości czasu pogłosu uzyskane metodą geometryczną dla poszczególnych wariantów modelowania pomieszczenia wypełnionego meblami przy określonych częstotliwościach.

Tabela 5

Zestawienie średnich wartości czasu pogłosu T_{30} w pomieszczeniu wypełnionym meblami, uzyskanych metodą geometryczną. Opis wariantów według tabeli 4

Wariant	Częstotliwość [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
	Czas pogłosu [s]					
01	1,40	0,73	0,68	0,72	0,69	0,63
02	1,53	1,12	0,71	0,51	0,44	0,35
03	1,72	1,68	1,39	0,89	0,64	0,55

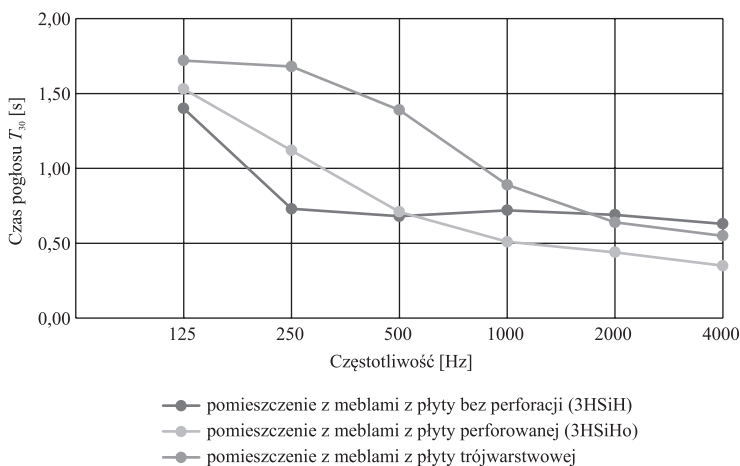
W tabeli 6 przedstawiono średnie wartości czasu pogłosu uzyskane metodą geometryczną dla poszczególnych wariantów modelowania pomieszczenia z panelem o powierzchni 10 m² przy określonych częstotliwościach.

Tabela 6

Zestawienie średnich wartości czasu pogłosu T_{30} w pomieszczeniu z panelem, uzyskanych metodą geometryczną

Wariant	Częstotliwość [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
	Czas pogłosu [s]					
01	1,98	1,20	1,04	0,93	0,76	0,67
02	2,25	1,75	1,08	0,71	0,52	0,42
03	2,27	2,33	1,79	1,08	0,72	0,60

Charakterystyki pogłosowe uzyskane po wprowadzeniu parametrów poszczególnych wariantów modelowania pomieszczenia z meblami przedstawia rysunek 7.

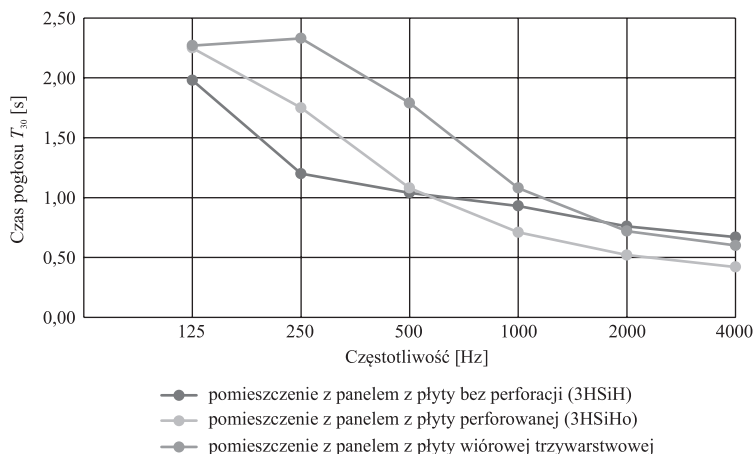


Rys. 7. Modelowana charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu w pomieszczeniu wypełnionym meblami wykonanymi z różnych materiałów

Charakterystyki pogłosowe uzyskane po wprowadzeniu parametrów poszczególnych wariantów modelowania pomieszczenia z panelem przedstawia rysunek 8.

Wykresy przedstawiają bardzo podobny charakter zależności pomiędzy średnim czasem pogłosu i częstotliwością dla metod pomiarowych we wszystkich trzech przypadkach różnego wypełnienia przestrzeni sekretariatu meblami. Różnice pomiędzy modelami

są nieznaczne, a ich charakterystyczny punkt przegięcia występuje przy częstotliwości 1000 Hz.



Rys. 8. Modelowana charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu w pomieszczeniu wypełnionym panelem wykonanym z różnych materiałów

W przypadku dużych pomieszczeń dokładność obliczeniowa zwiększa się w miarę zwiększania zakresu częstotliwości. Z punktu widzenia użytkownika analizowany jest zakres ludzkiego głosu, czyli częstotliwości od 250 Hz do 2 kHz.

Z zestawienia obliczeń średniego czasu pogłosu w pomieszczeniu wypełnionym meblami (rys. 7) obserwuje się, że dla częstotliwości: 125 Hz, 250 Hz i 500 Hz najniższe wartości uzyskano dla wariantu mebli z płyty bez perforacji, odpowiednio: 1,40 s, 0,73 s i 0,68 s.

W oktawie 1000 Hz najkrótszym czasem pogłosu charakteryzował się wariant pomieszczenia zamodelowanego meblami z materiału jednostronnie perforowanego. Wartość ta wynosiła 0,51 s, podczas gdy dla modelu z meblami wykonanymi z materiału bez perforacji czas pogłosu w pomieszczeniu był równy 0,72 s, a dla wariantu mebli z płyty wiórowej trzywarstwowej 0,89 s.

Najniższą wartość czasu pogłosu równą 0,44 s przy częstotliwości 2000 Hz wykazał model z płyty perforowanej. Najwyższą wartość wykazał model z płyty z falistym rdzeniem bez perforacji. Czas pogłosu wynosił 0,69 s.

Z przedstawionych na rysunku 8 wyników obliczeń numerycznych średniego czasu pogłosu w pomieszczeniu z panelem o powierzchni 10 m² wynika, że w przedziale częstotliwości 125–500 Hz najniższe wartości czasu pogłosu wykazał wariant z panelem z płyty HDF bez perforacji. Średnie wartości wynosiły odpowiednio: 1,98 s, 1,20 s, 1,04 s.

Przy częstotliwości równej 1000 Hz najkrótszy czas pogłosu wykazał wariant z panelem z płyty perforowanej (0,71 s). Najdłuższy czas pogłosu przy tej częstotliwości zaobserwowano dla wariantu z płyty wiórowej trzywarstwowej – 1,08 s.

Z powyższych symulacji można wnioskować o korzystnym wpływie perforowanych płyt meblowych na czas pogłosu w pomieszczeniu o małej objętości. W tym wariancie średni czas pogłosu przy częstotliwości 1 kHz w pomieszczeniu z meblami wynosi 0,51 s, a w pomieszczeniu z panelem jest równy 0,71 s, co mieści się w dolnej granicy przedziału optymalnego czasu pogłosu dla dobrej zrozumiałości mowy, który wynosi 0,5–1 s.

4.2. ANALIZA CZASU POGŁOSU USTALONEGO METODĄ POMIAROWĄ

Pomiary przeprowadzono dla wybranych wariantów umeblowania i zastosowanych materiałów analizowanych metodą numeryczną (tab. 7). Średnią wartość czasu pogłosu dla częstotliwości 500 Hz dla pasma częstotliwości równego 500 Hz przedstawiono w tabeli 8. Średnie wartości z pomiarów ilustrują rysunki 9, 10.

Tabela 7

Zestawienie poszczególnych wariantów pomiarów laboratoryjnych

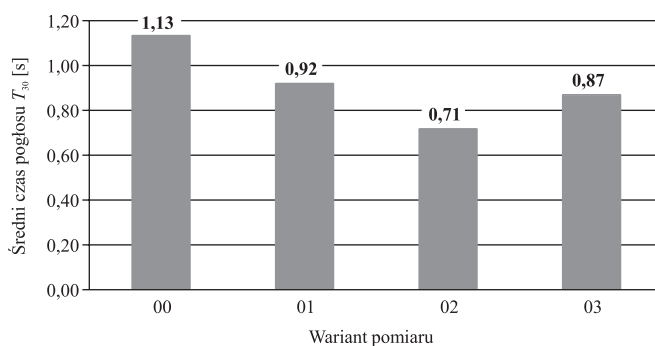
Wariant	Wyposażenie pomieszczenia
00p	pomieszczenie puste
01p	pomieszczenie z panelem z płyty bez perforacji 3HSiH
02p	pomieszczenie z panelem z płyty perforowanej 3HSiHo
03p	pomieszczenie z meblami z płyty trzywarstwowej

Tabela 8

Zestawienie wyników pomiaru czasu pogłosu T_{30} w pomieszczeniu uzyskanych metodą pomiarową dla częstotliwości 500 Hz

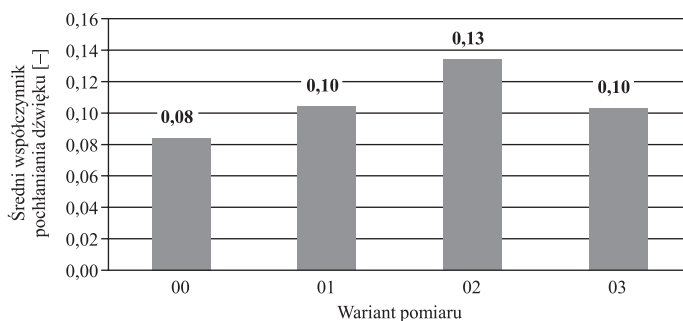
Wariant	Numer punktu pomiarowego					Średnia	Odchylenie standardowe
	1	2	3	4	5		
00p	1,13	1,07	1,20	1,07	1,18	1,13	0,06
01p	0,96	0,89	1,00	0,85	0,88	0,92	0,06
02p	0,85	0,76	0,72	0,61	0,76	0,71	0,07
03p	0,83	0,85	0,85	0,87	0,92	0,87	0,04

Dla częstotliwości 500 Hz najdłuższy czas pogłosu (1,13 s) zaobserwowano w pomieszczeniu pustym (rys. 9). Czas pogłosu uległ znaczącemu skróceniu (0,71 s) po wypełnieniu pomieszczenia referencyjnego panelem z płyty jednostronnie perforowanej 3HSiHo.



Rys. 9. Wykres średnich wartości czasu pogłosu T_{30} w pomieszczeniu referencyjnym

Najwyższy (0,13) współczynnik pochłaniania dźwięku w pomieszczeniu przez wszystkie elementy jego wyposażenia otrzymano dla wariantu z panelem z płyty jednostronnie perforowanej z rdzeniem falistym (rys. 10). Porównywalne wartości średniego współczynnika pochłaniania dźwięku uzyskano dla wariantów pomieszczeń wyposażonych w panele z płyty pełnej z rdzeniem falistym oraz płyty wiórowej trzywarstwowej. Wynik ten potwierdza prawidłowość, że wysokie współczynniki pochłaniania dźwięku wykazują tworzywa drzewne o niskiej gęstości warstw powierzchniowych i wysokiej porowatości.



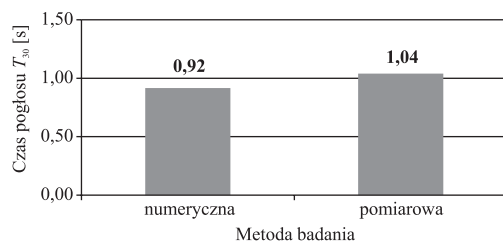
Rys. 10. Wykres wartości współczynnika pochłaniania dźwięku α_{sr} w pomieszczeniu referencyjnym

Dla częstotliwości 500 Hz, w przypadkach 01, 02, 03, średnie wartości czasu pogłosu uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych wynosiły odpowiednio 1,04 s, 1,08 s, 1,79 s. W przypadku metody pomiarowej wartości czasu pogłosu kształtowały się odpowiednio 0,92 s, 0,71 s, 0,87 s. Jest to spowodowane niewielką kubaturą pomieszczenia. Dla pomieszczeń o objętości około 50 m³ symulacje prowadzone w modelu geometrycznym uważa się za poprawne od pasma powyżej 1000 Hz. Zastosowanie metody numerycznej w przypadku pomieszczeń o małej objętości daje wyniki porównywalne z wynikami otrzymanymi metodą laboratoryjną, od częstotliwości 1000 Hz.

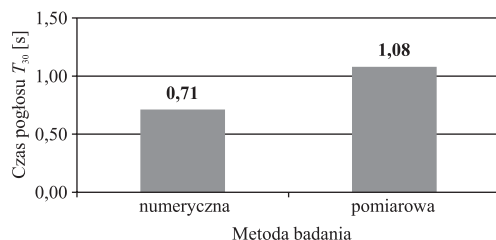
4.3. WPŁYW RODZAJU MATERIAŁU NA CZAS POGŁOSU W POMIESZCZENIU WYPEŁNIONYM MEBLAMI

Wyniki symulacji przeprowadzonej w programie CATT-Acoustic oraz metodą pomiarową dowodzą, że perforacja powierzchni materiału, z którego wykonano elementy wyposażenia pomieszczenia, ma korzystny wpływ na średnie wartości czasu pogłosu. Niezależnie od tego, czy pomiar wykonywano, modelując meble, czy panel ścienny, przy zastosowaniu płyty jednostronnie perforowanej z rdzeniem falistym uzyskiwano najkrótsze czasy pogłosu w pomieszczeniu. Z przedstawionych wyników pomiarów można zauważyć, że materiał ten wykazywał najwyższe wartości współczynnika pochłaniania dźwięku we wszystkich metodach.

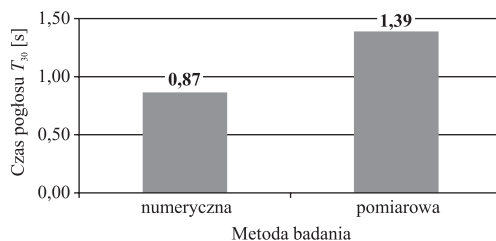
Bezpośrednie porównanie wyników uzyskanych metodą pomiarową z wynikami uzyskanymi metodą numeryczną przy częstotliwości 500 Hz przedstawiają rysunki 11–13.



Rys. 11. Średnie wartości czasu pogłosu T_{30} w pomieszczeniu z panelem bez perforacji



Rys. 12. Średnie wartości czasu pogłosu T_{30} w pomieszczeniu z panelem z perforacją



Rys. 13. Średnie wartości czasu pogłosu T_{30} w pomieszczeniu wypełnionym meblami wykonanymi z trzywarstwowej płyty wiórowej

Materiały o porowatej strukturze i znacznym zróżnicowaniu geometrycznym przy różnej gęstości mają istotny wpływ na zmianę czasu pogłosu w pomieszczeniu. Dźwięk docierający do takiej powierzchni nie odbija się, lecz jest przez nią absorbowany. Wprowadzone do wnętrza płyty fale akustyczne, dzięki dużej objętości powierzchniowej komór, są tam pochłaniane lub całkowicie rozproszone. Te uwarunkowania fizyczne materiałów wpływają na wzrost wartości współczynnika pochłaniania dźwięku, a ten na obniżenie czasu pogłosu w pomieszczeniu.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie wyników pomiarów sformułowano następujące wnioski i spostrzeżenia:

- porowata struktura powierzchni płyt, z których wykonano elementy wyposażenia pomieszczenia istotnie obniżyła czas pogłosu;
- materiały z perforowaną warstwą zewnętrzną wykazują zdecydowanie wyższe współczynniki pochłaniania dźwięku;
- zakres możliwości zastosowania metody numerycznej do oceny parametrów akustycznych w pomieszczeniach o małej objętości zaczyna się od 1 kHz;
- perforowane płyty meblowe o właściwościach dźwiękochłonnych stanowią bardzo dobry materiał do konstruowania mebli skrzyniowych.

Kolejne badania powinny zmierzać do oceny wpływu konstrukcji mebli na czas pogłosu w pomieszczeniu.

LITERATURA

- [1] Krzysik F.: Nauka o drewnie, Warszawa 1975
- [2] Smardzewski J., Kamiński T. (red.): Właściwości akustyczne materiałów stosowanych w meblarstwie, Poznań 2016
- [3] EN 322:1993 – Wood-based panels – Determination of moisture content
- [4] EN310:1993 – Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength
- [5] PN-EN ISO 10534-2:2003 Akustyka – Określenie współczynnika pochłaniania dźwięku i impedancji akustycznej w rurach impedancyjnych. Część 2: Metoda funkcji przejścia
- [6] Kuttruff H.: Room Acoustics. Fourth edition, London 2000