

POMIARY WŁASNOŚCI AKUSTYCZNYCH MATERIAŁÓW

Mariusz ŻÓŁTOWSKI

Politechnika Szczecińska

Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy izolacyjności akustycznej stropów drewnianych. Do ich badania wykorzystano funkcję FRF, charakteryzującą strukturę częstotliwościową wybranych materiałów. Zapoczątkowane badania winny być kontynuowane na obiektach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: akustyka, diagnostyka struktury materiałów, transmitancja

ACOUSTIC INVESTIGATIONS OF MATERIALS

Summary

The problems of acoustic isolation of wood ceilings in article were introduced. It the function to their investigation was used was the FRF, the characterizing frequency structure of chosen materials. Begin investigations will be continue on real objects.

Keywords: acoustic, diagnostic of structure of material, transmittation

1. WPROWADZENIE

Odpornością przegrody na przenikanie energii akustycznej jest izolacyjność akustyczna przegrody. W zależności od źródła energii akustycznej przenikającej przez przegrodę rozróżnia się: izolacyjność od dźwięków powietrznych oraz izolacyjność od dźwięków uderzeniowych [4]. Własności akustyczne przegród określone są wymaganiami normowymi, PN-70/B-2151, PN-68/B-02154. Izolacyjność akustyczna danej przegrody zależna jest od częstotliwości dźwięku przenikającej fali akustycznej, co wyznaczają krzywe izolacyjności akustycznej w funkcji częstotliwości. Dla potrzeb budownictwa mieszkaniowego i użyteczności publicznej wyznacza się charakterystyki izolacyjności akustycznej w przedziale 100-3200Hz. Kształt charakterystyk izolacyjności akustycznej wynika z charakteru dopuszczalnego poziomu hałasu oraz hałasu zewnętrznego i wewnętrznego.

Współcześnie powstające konstrukcje budowlane, takie jak mosty, budynki wysokie, kominy, fundamenty pod maszyny, maszty, dachy wspornikowe itp. mogą być poddawane znacznym wymuszeniom drganiowym. Drgania mogą mieć wpływ na stan użytkowania budowli poprzez zmniejszenie komfortu pracujących tam ludzi lub mogą osiągnąć poziom zagrażający bezpieczeństwu konstrukcji. Dynamiczne efekty

spowodowane przez wiatr, trzęsienia ziemi, prace maszyn, ruch kolejowy i drogowy, wybuchy w kamieniołomach, fale morskie stały się ważne w procesie projektowania konstrukcji i mają wpływ na ich bezpieczeństwo i trwałość.

Wpływ drgań na konstrukcję przejawia się głównie jako dodatkowe naprężenia w rozpatrywanym przekroju, które sumują się z naprężeniami od działających na konstrukcję obciążeń statycznych. Ponadto pojawiają się jeszcze skutki związane ze zmęczeniem materiału. Obciążenie dynamiczne mogą powodować skutki niszczące w budynkach o różnych typach konstrukcji lub też doprowadzać do katastrofalnego zniszczenia. Do współczesnych metod badawczych w obszarze minimalizacji hałasu zalicza się:

- a) metodę elementów skończonych,
- b) metodę elementów brzegowych,
- c) analizę modalną.

Stosowanie tych metod pozwala one na lepsze zrozumienie zachowania się złożonych konstrukcji, optymalizację w procesie ich projektowania i ocenę stanów niebezpiecznych. Analizy własności dynamicznych w większości przypadków spotykanych w praktyce dokonuje się na podstawie analizy zachowań modelu konstrukcji. Jakość analizy zależy od wiarygodności modelu, która mierzona jest zgodnością zachowań obiektu i modelu poddanych zaburzeniom tego samego rodzaju. Model

konstrukcji może być tworzony w procesie analitycznych przekształceń stosowanych do opisu dynamiki układu, bądź na podstawie wyników eksperymentów wykonywanych na rzeczywistym obiekcie.

2. ŹRÓDŁA HAŁASÓW I DROGI ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ DŹWIĘKÓW

Hałasy decydujące o klimacie akustycznym pomieszczeń w budynkach pochodzą z trzech podstawowych źródeł:

- hałasy przenikające z zewnątrz budynku - pochodzące od środków komunikacji i transportu, hałasy tzw. osiedlowe (np. bawiące się dzieci), komunalne (np. pochodzące z obiektów sportowych i rekreacyjnych), przemysłowe (pochodzące od obiektów i zakładów przemysłowych);
- hałasy przenikające z innych pomieszczeń zlokalizowanych w tych samych budynkach, których źródłem może być działalność człowieka, użytkowanie wszelkiego rodzaju urządzeń;
- hałasy instalacyjne pochodzące od technicznego wyposażenia budynku (od instalacji wodociągowych, centralnego ogrzewania, wentylacyjnych, dźwigowych). Do tej grupy zaliczane są również hałasy przenikające do pomieszczeń chronionych z wszelkiego rodzaju pomieszczeń usługowych, związanych i niezwiązanych z funkcją danego budynku.

Przenikanie hałasów do pomieszczeń w budynkach odbywa się dwiema drogami:

- za pośrednictwem ośrodka powietrznego, w postaci tzw. dźwięków powietrznych rozprzestrzeniających się w tym ośrodku; do grupy dźwięków przestrzennych zaliczane są również fale akustyczne przenikające przez przegrody otaczające rozpatrywane pomieszczenie, np. przez ścianę zewnętrzną budynku przy zamkniętych oknach, przez ścianę oddzielającą pomieszczenie od innych „hałaśliwych” pomieszczeń sąsiednich;
- za pośrednictwem ośrodka stałego, w postaci dźwięków materiałowych, które następnie są wypromieniowane do pomieszczeń w postaci dźwięków powietrznych; przenikanie hałasów za pośrednictwem ośrodka stałego następuje zarówno przy występowaniu źródeł dźwięków powietrznych, jak i materiałowych.

3. DRGANIA W KONSTRUKCJACH BUDOWLANYCH

W akustyce budowlanej rozróżniamy dodatkowo pojęcie dźwięki uderzeniowe. Powstają one pod wpływem uderzenia w przegrodę budowlaną (najczęściej w strop podczas chodzenia, przesuwania mebli, toczenia

przedmiotów) i rozprzestrzeniają się w postaci dźwięków materiałowych i powietrznych o długości fali:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

gdzie: λ - długość fali dźwiękowej [m], c - prędkość dźwięku [m/s], f - częstotliwość dźwięku [Hz], T - okres drgań [s].

Częstotliwość fali dźwiękowej f jest to liczba okresów drgań w ciągu 1 sekundy. Długość fali dźwiękowej λ jest to odległość, jaką przebywa fala akustyczna w czasie jednego okresu drgań. Od długości fali akustycznej zależy charakter wielu zjawisk akustycznych, np. ugięcie fali. W ciałach stałych mogą się rozchodzić wszystkie rodzaje fal akustycznych. Prędkość ich zależna jest nie tylko od rodzaju fali, ale również od cech sprężystych materiału i kształtu elementu.

Stosunek natężenia dźwięku fali pochłoniętej I_p (energii pochłoniętej E_p), przy przenikaniu do drugiego ośrodka, do natężenia dźwięku fali padającej I_{pad} (energii padającej E_{pad}) na granicy tych ośrodków w polu fali płaskiej określa się jako *współczynnik pochłaniania dźwięku*:

$$\alpha = \frac{I_p}{I_{pad}} = \frac{E_p}{E_{pad}} \quad (2)$$

Miarą izolacyjności akustycznej właściwej przegrody jest stosunek całkowitej energii akustycznej padającej na przegrodę do całkowitej energii akustycznej przenikającej przez przegrodę:

$$R_w = 10 \lg \frac{E_1}{E_2} = 10 \lg \frac{1}{\tau} \quad (3)$$

gdzie: τ - współczynnik przenikalności.

Izolacyjność właściwa przegrody rozdzielającej dwa pomieszczenia jest wyznaczana z zależności:

$$R_w = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (4)$$

gdzie: L_1 - poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym, L_2 - poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym, S - powierzchnia przegrody, A - chłonność akustyczna w m^2 .

Chłonność akustyczna pomieszczenia A jest obliczana ze wzoru empirycznego:

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (5)$$

gdzie: V - objętość pomieszczenia za przegrodą, T - czas pogłosu.

Izolacyjność akustyczna od dźwięków uderzeniowych jest parametrem określającym własności akustyczne stropów w odniesieniu do przenikania przez nie energii akustycznej przy mechanicznym pobudzeniu stropu do drgań.

Określa się ją za pomocą poziomu uderzeniowego L_{ur} , wytwarzającego się pod stropem:

$$L_{ur} = L_u - 10 \lg \frac{A_0}{A} + 10 \lg n \quad (6)$$

gdzie: L_{ur} - poziom uderzeniowy, L_u - poziom pod stropem, A - chłonność akustyczna, n - stała filtracji.

Poziom uderzeniowy określa się w postaci charakterystyki poziomu uderzeniowego w funkcji częstotliwości w mierzonych pasmach.

Dynamiczną sztywność warstwy materiału określa się metodą rezonansową, która polega na pobudzaniu obciążonej próbki materiału do drgań i znajdowaniu częstotliwości własnej układu. Sztywność próbki k określa się na podstawie częstotliwości rezonansowej układu z zależności:

$$k = \omega^2 M \quad (7)$$

Sztywność dynamiczną warstwy materiału s oblicza się ze sztywności k badanej próbki z wyrażenia:

$$s = \frac{k}{S} \quad (8)$$

gdzie: S - powierzchnia mierzonej próbki.

Przegrody budowlane powinny się charakteryzować własnościami:

- a) ściany wewnętrzne i zewnętrzne, okna i drzwi - izolacyjnością od dźwięków powietrznych;
- b) stropy - izolacyjnością od dźwięków powietrznych i materiałowych.

Przegrody pojedyncze

Przenikanie dźwięku przez przegrody jest zjawiskiem skomplikowanym. Ogólnie można stwierdzić, że przenikanie energii akustycznej przez przegrodę odbywa się głównie wskutek drgań przegrody jako całości i może być zwiększone przez nieszczelności samej konstrukcji lub materiału. Drgania przegrody zależą nie tylko od cech samej przegrody, ale również od sposobu pobudzania, co w przypadku pola akustycznego wiąże się z kątem padania fali dźwiękowej.

Izolacyjność akustyczną płyt przy prostopadłym padaniu fali akustycznej określa się wzorem:

$$R = 20 \lg \frac{\omega M}{2 \rho_0 c} \quad (9)$$

ω - częstotliwość kątowna dźwięku [Hz],

M - masa przegrody przypadająca na jednostkę powierzchni [kg/m^2],

ρ_0 - gęstość właściwa powietrza [kg/m^3],

c - prędkość dźwięku w powietrzu [m/s].

Fala akustyczna padająca na przegrodę pod kątem θ może być rozłożona na dwie składowe. W wyniku działania składowej równoległej do przegrody, w przegrodzie powstają fale giętne. Jeżeli prędkość fal giętnych c_g w płycie jest równa

składowej prędkości fali dźwiękowej padającej na płytę pod kątem θ , to znaczy, jeżeli:

$$\frac{c}{\sin \theta} = Cg \quad (10)$$

to między ośrodkiem, a przegrodą zachodzi zjawisko „rezonansu przestrzennego”, tzw. zjawisko koincydencji. W wyniku tego następuje wzrost drgań przegrody, co prowadzi do znacznego obniżenia izolacyjności. Zjawisko koincydencji może występować przy każdej częstotliwości powyżej częstotliwości granicznej przegrody wyrażonej wzorem:

$$f_{gr} = \frac{c^2}{2 \Pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad (11)$$

gdzie: c - prędkość dźwięku w powietrzu [m/s], M - masa jednostkowa przegrody [kg/m^2], B - sztywność przegrody [$\text{N} \cdot \text{m}^2$].

Charakterystyki izolacyjności akustycznej ścian

W charakterystykach izolacyjności akustycznej ścian uwidaczniają się wszystkie zjawiska opisane powyżej. Można jednak zauważyć, że w przypadku płyt cienkich kształt krzywej izolacyjności jest bardziej zbliżony do teoretycznego niż w przypadku płyt grubych. Związane jest to z dodatkowym, nie ujętym we wzorach teoretycznych, wpływem grubości i sztywności przegrody [4].

Właściwości akustyczne konstrukcji stropowych

Stropy, w odróżnieniu od ścian, powinny charakteryzować się nie tylko odpornością na przenikanie dźwięków powietrznych, ale również zgodnymi normami, tłumieniem dźwięków uderzeniowych. Izolacyjność akustyczna właściwa płyt stropowych pełnych i kanałowych podlega empirycznemu prawu masy, przy czym związek między masą stropu a ważonym wskaźnikiem izolacyjności akustycznej właściwej jest różny dla płyt pełnych i kanałowych. Tłumienie dźwięków uderzeniowych przez płytę stropową jest uzależnione od masy stropu, grubości i konstrukcji. Dla płyt pełnych poziom uderzeniowy po stropem określa wyrażenie:

$$L = 10 \lg \frac{f^{0,5}}{S \chi^{1,25} d^{3,5} E^{0,75} \eta} \text{ [dB]} \quad (12)$$

gdzie: S - powierzchnia stropu [m^2],

d - grubość stropu [m],

χ - gęstość materiału [kg/m^3],

E - moduł sprężystości [N/m^2],

η - współczynnik strat wewnętrznych,

f - częstotliwość [Hz].

4. ANALIZA MODALNA W BADANIU STROPÓW

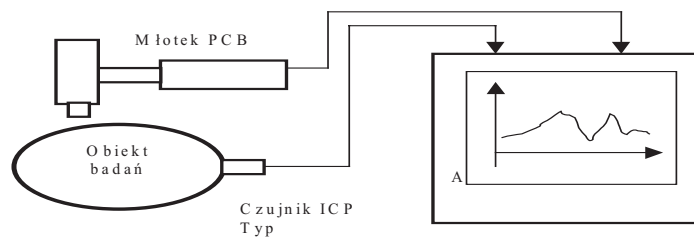
Do badań układów złożonych, często nieliniowych, używa się dla potrzeb identyfikacji złożonej metod analizy modalnej. W wyniku przeprowadzenia analizy modalnej otrzymuje się model modalny, który stanowi uporządkowany zbiór częstości własnych, odpowiadających im współczynników tłumienia oraz postaci drgań własnych. Na podstawie znajomości modelu modalnego można przewidzieć reakcje obiektu na dowolne zaburzenie, zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości. W większości praktycznych zastosowań wyróżnia się następujące rodzaje analizy modalnej:

- **teoretyczną**, która wymaga rozwiązania zagadnienia własnego dla przyjętego modelu strukturalnego badanego obiektu,
- **eksperymentalną**, wymagającą sterowanego eksperymentu identyfikacyjnego, podczas

którego wymusza się ruch obiektu (np. drgania) oraz dokonuje pomiaru wymuszenia i pomiaru odpowiedzi w wielu punktach pomiarowych, rozmieszczonych na badanym obiekcie,

- **eksploatacyjną**, opierającą się na eksperymencie eksploatacyjnym, w którym dokonuje się pomiarów tylko odpowiedzi układu w wielu punktach pomiarowych, podczas gdy ruch obiektu spowodowany jest rzeczywistymi wymuszeniami eksploatacyjnymi.

W badaniach jakości stropów budowlanych dynamiczna sztywność materiału można określać przy wykorzystaniu eksperymentalnej analizy modalnej. Eksperyment identyfikacyjny w eksperymentalnej analizie modalnej (rys.1) polega na wymuszeniu drgań obiektu przy jednoczesnym pomiarze siły wymuszającej i odpowiedzi układu, najczęściej w postaci widma przyspieszeń drgań.

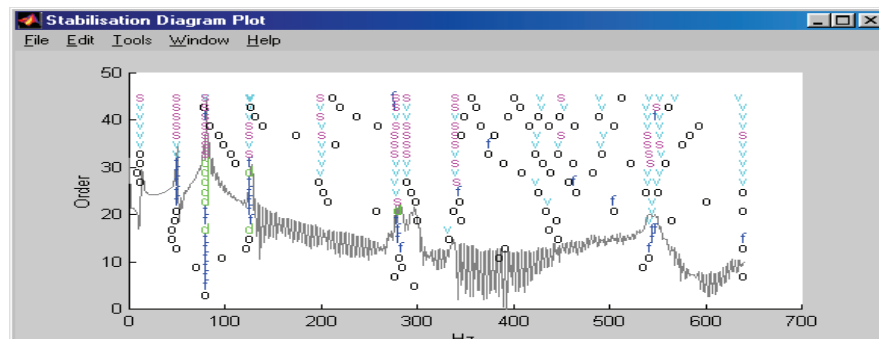


Rys.1. Zestaw aparatury użytej do badań w eksperymentalnej analizie modalnej.

Do identyfikacji modelu modalnego obiektu danymi wejściowymi do systemu są przebiegi czasowe drgań mechanicznych, występujących w węzłowych punktach obiektu, odniesione do jednego z nich (o najwyższej amplitudzie).

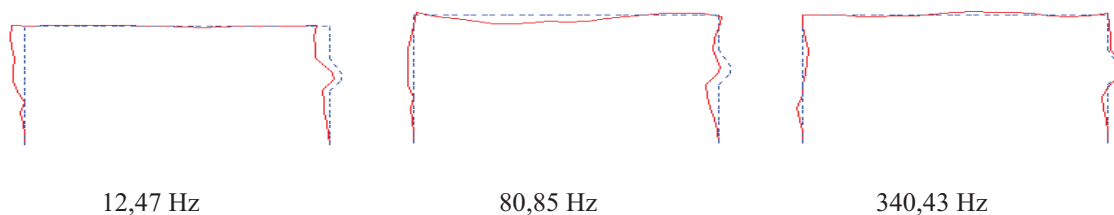
Wyniki pomiarów oraz model geometryczny wykorzystano w systemie LMS CADA-PC do

estymacji parametrów modelu modalnego. Na kolejnym rys. 2 przedstawiono przykładowy diagram stabilizacyjny. Możliwa jest obserwacja animacji drgań modelu dla wybranych częstości własnych. Na rys. 3 przedstawione są przykładowe postacie drgań dla wybranych częstości własnych.



Rys. 2. Diagram stabilizacyjny

Oznaczenia: o - biegun niestabilny, f - biegun ma stałą częstość, v - biegun ma stałą częstość i wektor modalny, s -biegun stabilny



Rys. 3 Przykładowe postacie drgań dla wybranych częstości własnych

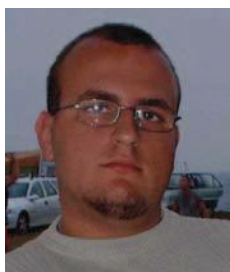
4. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione wyniki rozważań wskazują na fakt, iż istnieje możliwość rozróżniania własności materiałowych, odróżniających od siebie różne materiały budowlane, co ma wpływ na możliwość rozróżniania własności izolacyjnych. Wymaga to jednak badań stanowiskowych w eksperymentalnej analizie modalnej na różnych układach konstrukcji, a także badań na rzeczywistych obiektach budowlanych.

LITERATURA

[1] Chmielewski T., Zembaty Z.: Podstawy dynamiki budowli. ARKADY, Warszawa 1998.

- [2] Godyeki-Ćwirko T., Mielczarek Z.: O badaniach i stosowaniu konstrukcji drewniano-żelbetowych. Inżynieria i Budownictwo, 5/1997.
- [3] Katalog budownictwa szkieletowego. Gdańsk 1999.
- [4] Sadowski J.: Podstawy izolacyjności akustycznej ustrojów. PWN, Warszawa, 1973.
- [5] Schlapfer R.: Schallschutz mit Schwingung solampfern Bauen mit Holz. 5/2004.
- [6] Żółtowski M.: Identyfikacja zagrożeń drganiowych obiektów budowlanych. Materiały konferencyjne, 2005.



Mgr inż. Mariusz ŻÓŁTOWSKI jest doktorantem Politechniki Szczecińskiej, na kierunku Budownictwo. Jest absolwentem Wydziału Nauk Technicznych - kierunku Budownictwo, Uniwersytetu Warmińsko - Mazurskiego. Zajmuje się zagadnieniami izolacyjności stropów budowlanych w ujęciu modelowania i badania ich dynamiki. Jest autorem lub współautorem trzech publikacji naukowych.