
MIERZYSZ I WIESZ

PIEZOELEKTRYCZNE
WSZECHKIERUNKOWE
ŹRÓDŁO DŹWIĘKU
DO AKUSTYCZNYCH BADAŃ
W SKALI W ZAKRESIE ULTRADŹWIĘKÓW

Piezoelectric omnidirectional sound source
for acoustic scale modelling in ultrasonic frequency range

Bartłomiej CHOJNACKI, Jarosław RUBACHA, Michał ZIOBRO

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
bartlomiej.chojnacki@g.pl

STRESZCZENIE

Celem projektu było opracowanie wszechkierunkowego źródła dźwięku do akustycznych badań na modelach w skali. Badania modelowe wymagają zastosowania specjalnych źródeł dźwięku przenoszących dźwięki w paśmie od 800 Hz do 40 000 Hz. Do budowy prototypowego źródła dźwięku użyto przetworników piezoelektrycznych. Wykonano pomiary w komorze bezechowej i porównano różne modele dostępnych piezoelementów pod względem wpływu sposobu ich zamocowania na pasmo odtwarzanych częstotliwości. Z uwagi na dużą rozbieżność w charakterystykach częstotliwościowych zastosowanych przetworników wykorzystano algorytmy filtrujące celem poprawienia działania urządzenia. W rozdziale zaprezentowane zostaną dotychczasowe postępy oraz zarys badań planowanych w przyszłości.

ABSTRACT

Paper presents design of omnidirectional sound source for scale modeling. Ultrasonic modelling requires special tools in order to achieve appropriate frequency range. The aim of the project is to build the source that's frequency response range from 800 to 40 000 Hz with the best possible omnidirectional characteristics. For the prototype construction piezoelectric transducers were used. In an anechoic chamber we measured and compared different available piezoelements in order to check how placement affects directivity and frequency response. Because of the grand dispersion in frequency characteristics of measured elements filtering algorithms were used. This paper presents progress in work at the moment and introduces outline for future development.

1. WSTĘP

Obecnie najczęściej stosowanymi metodami wyznaczania współczynnika pochłaniania dźwięku jest metoda pomiaru w rurze impedancyjnej oraz w komorze pogłosowej. O ile pierwsza z nich jest stosunkowo prosta, o tyle wyznaczenie tzw. pogłosowego współczynnika pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej często przysparza wiele problemów. Oprócz konieczności wykonywania badań w specjalistycznym laboratorium (z komorą pogłosową zapewniającą warunki pola rozproszonego), problemem jest przygotowanie próbek badanego materiału o odpowiedniej wielkości (ok. 10 m²) oraz ich transport do laboratorium. We wstępnym etapie badań i prototypowania ograniczenia te można ominąć, stosując metodę pomiarów akustycznych w skali. Pozwala ona wyznaczyć pogłosowy współczynnik pochłaniania dźwięku przy użyciu modelu komory pogłosowej w skali np. 1:8 oraz próbki w tej samej skali. Wymagania normy PN-EN ISO 354:2005 określają możliwość stosowania do badań próbek materiałów o powierzchni ok. 0,2 m². Oprócz pomiarów współczynnika pochłaniania lub rozpraszania dźwięku badania akustyczne w skali stwarzają wiele innych możliwości pomiarowych takich jak badanie wpływu rozstawienia elementów widowni czy kształtu ekranów akustycznych na rozkład ciśnienia akustycznego i kierunki rozchodzenia się fal dźwiękowych. Wykonanie pomiarów tego typu w warunkach pełnowymiarowej komory pogłosowej jest niemożliwe lub w znacznym stopniu utrudnione, natomiast używając próbek ośmiokrotnie mniejszych, możemy praktycznie bez wysiłku zmieniać

ich ustawienie, tańsze jest także wykonywanie modeli testowych. Pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku w zakresie ultradźwiękowym jest też uzasadniony przy redukcji zagrożenia hałasem ultradźwiękowym, gdyż zazwyczaj producenci nie podają informacji na temat pochłaniania dźwięku przez materiały dźwiękochłonne w paśmie powyżej 20 kHz, a ze względu na duże rozbieżności i inny charakter propagacji fali dźwiękowej należy uwzględnić te różnice przy projektowaniu systemów redukcji hałasu [1].

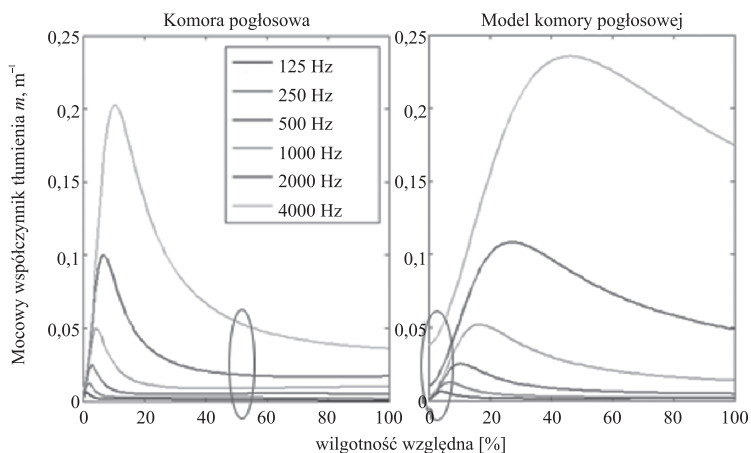
Oprócz odpowiednio przygotowanego stanowiska pomiarowego, spełniającego warunki pola rozproszonego, modelowanie akustyczne w skali wymaga stosowania specjalnych źródeł dźwięku. Standardowy zakres częstotliwości sygnału pomiarowego (100–5000 Hz) należy przeskalować do zakresu ultradźwiękowego, zgodnie z założeniami teorii podobieństwa dla akustyki [1]. Oprócz tego źródło dźwięku musi być niewielkich wymiarów, co ograniczy zaburzenia pola akustycznego wewnątrz komory i nie będzie przyczyną powstania istotnego cienia akustycznego. Z tego względu standardowe i produkowane komercyjnie źródła wszechkierunkowe nie nadają się do stosowania w modelowaniu w skali. Natomiast stosowane dotychczas iskrowe źródła dźwięku mają ograniczenia wynikające z braku kontroli nad czasem trwania i głośnością sygnału pomiarowego.

Niniejszy rozdział przedstawia propozycję nowego źródła dźwięku do pomiarów akustycznych w skali, eliminującego problemy wynikające ze stosowania źródła iskrowego oraz mającego lepsze parametry wszechkierunkowości oraz pasma przenoszenia. Jego konstrukcję oparto na akustycznych przetwornikach piezoelektrycznych, wykorzystujących do generacji dźwięku odwrócony efekt piezoelektryczny. To rozwiązanie ma wiele zalet: przetworniki piezoelektryczne wykorzystuje się jako zwyczajne głośniki, w których można całkowicie kontrolować generowany sygnał i użyć dowolnego sygnału pomiarowego. Ponadto większość produktów powszechnie dostępnych na rynku cechuje się niewielkimi wymiarami oraz niską ceną. Przetworniki piezoelektryczne świetnie sprawdzają się także w generacji sygnałów akustycznych z zakresu ultradźwięków.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Modelowanie akustyczne w skali opiera się na założeniach teorii podobieństwa, po raz pierwszy sformułowanych w 1934 r. przez profesora François-Henri van den Dungena w pracy *Acoustique des Salles* [2]. Przedstawił on warunki, jakie musi spełniać model oraz metodyka wykonywania pomiarów, aby wyniki otrzymane na drodze pomiarów w skali mogły odpowiadać pomiarom w skali rzeczywistej. Model komory pogłosowej, używany w Laboratorium Akustyki Technicznej Katedry Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie został skonstruowany z przyjęciem współczynnika skali równego 1:8, co oznacza (zgodnie z założeniami teorii podobieństwa) konieczność stosowania ośmiokrotnie większych częstotliwości pomiarowych, czyli częstotliwości rzędu 800–40 000 Hz (ośmiokrotność standardowego zakresu pomiarów wykonywanych w akustyce pomieszczeń, wynoszącego 100–5000 Hz). Dodatkowe wyposażenie stanowiska pozwala także na dostosowanie współczynnika pochłaniania dźwięku przez

powietrze za pomocą układu do osuszania powietrza wewnątrz komory, wyposażonego w odpowiednie czujniki wilgotności i temperatury oraz wkłady osuszające z żelu krzemionkowego. Dzięki odpowiedniemu dostosowaniu wilgotności względnej eliminuje się błąd wynikający z braku skalowania współczynnika pochłaniania dźwięku przez powietrze [3]. Rysunek 1 przedstawia zależność mocowego współczynnika tłumienia w funkcji wilgotności – zaznaczone obszary to zakresy pomiarowe odpowiednio dla komory i jej modelu. Właściwe dopasowanie osiąga się przez zmniejszenie wilgotności względnej w modelu.



Rys. 1. Zależności mocowego współczynnika pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej i w modelu w skali [3]

Aby w pomiarach w skali dobrać odpowiednie materiały, tj. materiały możliwe do zastosowania w pełnowymiarowym obiekcie, należy znaleźć ustroje dające zbliżone wyniki w odpowiadających sobie pasmach częstotliwości (800–40 000 Hz dla modelu i 100–5000 Hz dla obiektu rzeczywistego) [3].

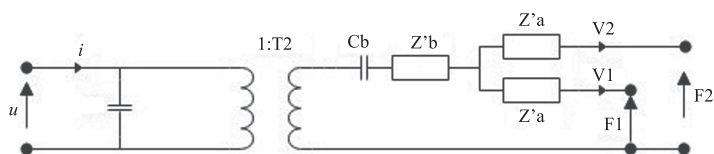
Przy projektowaniu źródła wybrano kształt dwunastościanu foremego, pozwalającego na zamocowanie na każdej ścianie jednego przetwornika w celu uzyskania jak najlepszej wszechkierunkowości. Krawędź bryły prototypu wynosiła 20 mm, przy budowie kolejnego egzemplarza zostanie powiększona do 30 mm. Przy takich wymiarach źródło miało objętość ok. 370 cm^3 , dzięki czemu jego wpływ na pole akustyczne można uznać za pomijalnie mały. Jako źródła dźwięku użyto elementów piezoelektrycznych wykonanych z ditlenku krzemu (kwarcu).

Efekt piezoelektryczny polega na pojawieniu się ładunków elektrycznych na powierzchni materiału (kryształu piezoelektrycznego) pod wpływem naprężeń mechanicznych. Zjawisko to znane jest od 1880 r. za sprawą francuskich fizyków Pierre'a i Jacques'a Curie i od tamtego czasu jest szeroko wykorzystywane w technice. Mechanizm efektu piezoelektrycznego jest związany z występowaniem elektrycznego momentu dipolowego w ciałach stałych. Komórka elementarna piezoelektryka nie ma środka symetrii, odkształcenie

struktury powoduje zmianę położenia jonów dodatnich i ujemnych, co polaryzuje kryształ [4]. Objawia się to pojawieniem się na krawędziach kryształu ładunku elektrycznego, który jest proporcjonalny do przyłożonego naprężenia. Natomiast odwrócony efekt piezoelektryczny polega na zmianie wymiarów kryształu po umieszczeniu w polu elektrycznym, także z zachowaniem proporcjonalności.

Przetworniki piezoelektryczne mogą występować w formie monomorfu (warstwy materiału piezoelektrycznego połączonej z metalowym podłożem) lub bimorfu (dwóch połączonych elementów piezo). Do budowy źródła prototypowego użyte zostały przetworniki będące monomorfami, które teoretycznie mają dwukrotnie mniejszy od bimorfów moment zginający [5]. W przyszłości planowane są testy przetworników dwupłytkowych (bimorfów).

Na rysunku 2 przedstawiono zastępczy schemat elektryczny przetwornika piezoelektrycznego: $F1$ i $F2$ to przeciwnie skierowane siły przyłożone do dwóch powierzchni drgających, a $V1$ i $V2$ prędkości tych ścian, (u to napięcie między metalizowanymi powierzchniami przetwornika, i – natężenie prądu płynącego przez przetwornik, $T2$ – współczynnik przetwarzania elektromechanicznego, natomiast Cb – ujemna podatność mechaniczna [5]).

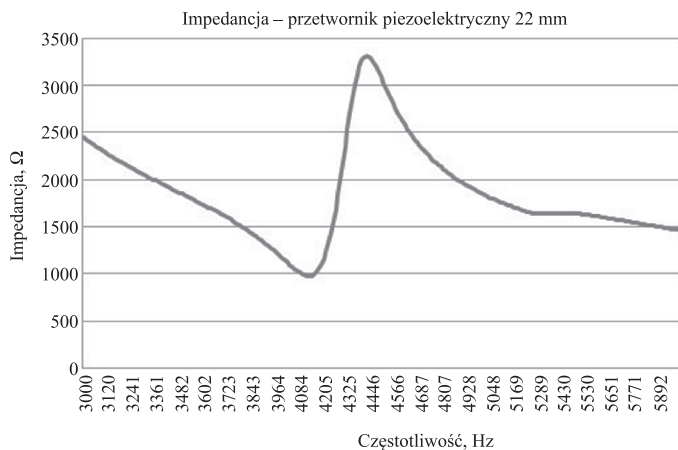


Rys. 2. Schemat zastępczy przetwornika piezoelektrycznego [5]. Objaśnienia w tekście

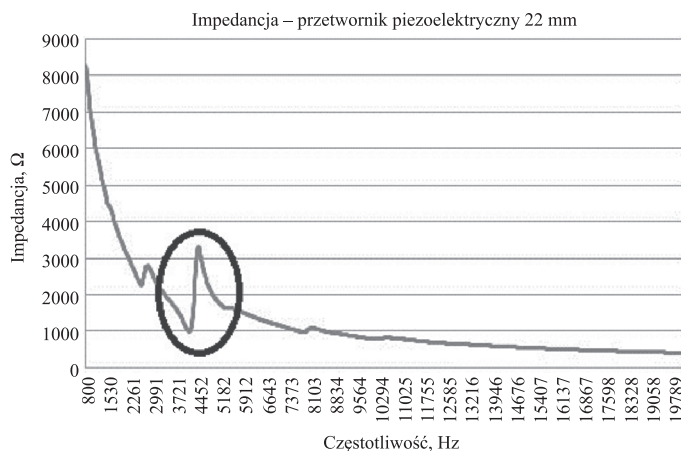
Dla projektu najistotniejsze jest występowanie impedancji mechanicznych $Z'a$ oraz $Z'b$, z którymi wiąże się zjawisko rezonansu, także akustycznego. Impedancje mechaniczne powodują powstawanie istotnych rozbieżności amplitud w charakterystyce częstotliwościowej przetwornika oraz znaczny wzrost skuteczności dla częstotliwości okołorezonansowych (minimalna impedancja). Równocześnie każdy element posiada także częstotliwość antyrezonansową, przy której impedancja jest maksymalna, a skuteczność spada [6]. W celu dokładniejszego zbadania tego zjawiska przeprowadzono pomiary impedancji użytych przetworników ze szczególnym uwzględnieniem miejsca występowania rezonansu.

Problemem związanym z częstotliwością rezonansową jest znaczna jej rozbieżność (dochodząca nawet do kilkuset herców), nawet dla przetworników tego samego typu i pochodzących z tej samej partii produkcyjnej. W zdecydowanej większości obecnych zastosowań piezoelektryków występowanie częstotliwości rezonansowej jest zjawiskiem pożądanym, gdyż praca przetwornika w okolicy rezonansu pozwala na otrzymanie dźwięku o znacznie wyższym poziomie przy dużo mniejszym koszcie energetycznym [7]. Przy budowie kolejnego egzemplarza prezentowanego źródła zastosowane zostanie rozwiązanie mające na celu zminimalizowanie wpływu występowania częstotliwości rezonansowej przetwornika piezoelektrycznego, gdyż jest to efekt niekorzystny dla źródła, które

powinno mieć maksymalnie płaską charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową. Badane przetworniki wykazały występowanie rezonansu w zakresie 3–5 kHz (rys. 3), a więc w badanym paśmie częstotliwości.



Rys. 3. Impedancja pojedynczego przetwornika piezoelektrycznego w okolicy rezonansu



Rys. 4. Impedancja pojedynczego przetwornika piezoelektrycznego

Analizując wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 4, można zauważyć jeszcze drugi, znacznie mniejszy rezonans występujący dla niższej częstotliwości w stosunku do rezonansu głównego. Wynika to prawdopodobnie z występowania (według rysunku 2) dwóch impedancji mechanicznych, z których każda ma inny rezonans. Dokładniejsze zbadanie impedancji przetworników piezoelektrycznych i jej wpływu na działanie źródła wszechkierunkowego jest przedmiotem przyszłych badań nad projektem.

3. PROTOTYP

Podczas projektowania prototypu źródła zbadano kilka rodzajów przetworników różniących się wymiarami oraz deklarowanymi przez producenta częstotliwościami rezonansowymi. Przeprowadzono także pomiary sprawdzające wpływ rodzaju zastosowanej obudowy (lub jej braku) oraz sposobu zamocowania przetwornika do obudowy źródła (rysunek 5 – prezentacja badanych próbek) na charakterystyki amplitudowo-częstotliwościową oraz kierunkową. Badania obejmowały wyznaczenie charakterystyk w zakresie 800–40 000 Hz. Na podstawie otrzymanych wyników możliwe było dobranie typu przetwornika, jego obudowy oraz sposobu zamocowania, które najlepiej sprawdzą się jako elementarne źródła dźwięku w prototypie źródła wszechkierunkowego.



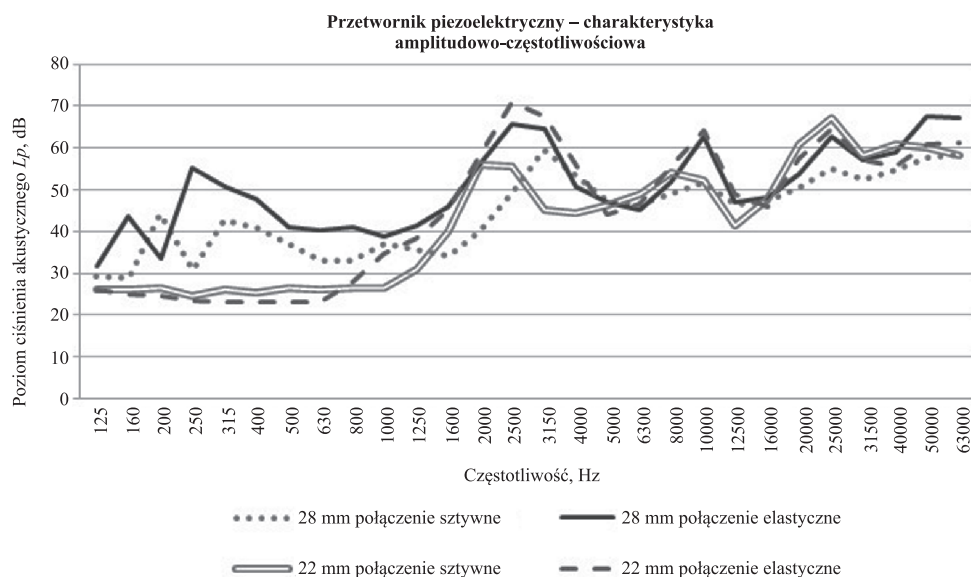
Rys. 5. Wybrane próbki piezoelementów użyte w badaniach

Wszystkie pomiary zostały wykonane w komorze bezchłowej znajdującej się w KMiW. użytym sygnałem pomiarowym był szum różowy, pomiary wykonywano w warunkach pola swobodnego w odległości 1 m od źródła dźwięku. Wykorzystany sprzęt pomiarowy:

- analogowy generator szumu Brüel & Kjær typ 1405,
- mikrofon pola swobodnego GRAS 46 BF ¼”,
- wzmacniacz Brüel & Kjær,
- karty pomiarowe National Instruments, oprogramowanie LabVIEW.

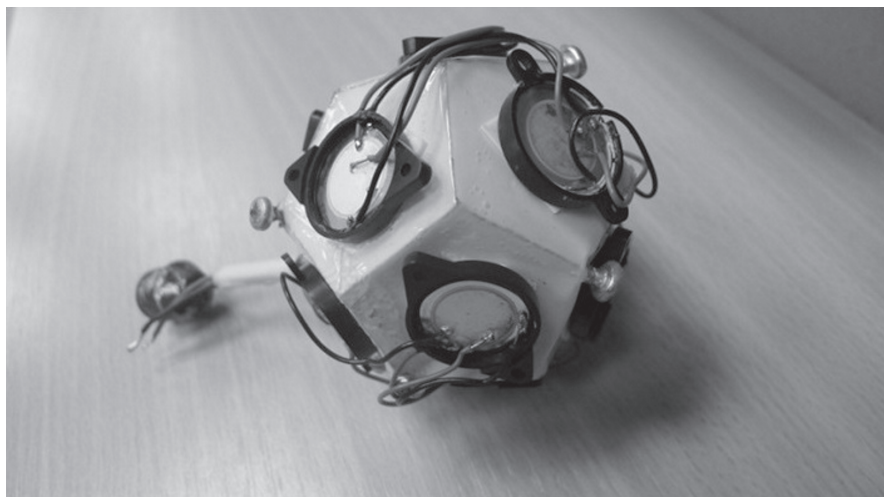
Otrzymane wyniki poziomu ciśnienia akustycznego (L_p) dla przetworników piezoelektrycznych pozwoliły stwierdzić, że największy wpływ na charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową ma dobór odpowiedniego rozmiaru elementu. Wpływ zastosowanej obudowy i sposobu mocowania był mniejszy, jednak wciąż zauważalne są wyraźne różnice (rys. 6).

Testowane były przetworniki w dwóch rozmiarach: o średnicy 22 mm oraz 28 mm. Oba przetworniki wykazały możliwość generacji fali akustycznej w zakresie ultradźwięków, nawet powyżej założonej granicy 40 kHz, co jest w pełni satysfakcjonujące do zastosowania w źródle wszechkierunkowym. Głównym problemem okazało się generowanie częstotliwości z dolnego zakresu wymaganych częstotliwości, czyli pasma 800–1500 Hz. W tym aspekcie lepiej sprawdziły się większe przetworniki o średnicy 28 mm, które cechują się mniejszymi zafalowaniami charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej oraz zdolnością efektywniejszej generacji niższych częstotliwości.



Rys. 6. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe przetworników piezoelektrycznych o średnicy 22 i 28 mm przy różnym sposobie montowania w obudowie

Obudowę prototypu, którym był papierowy model dwunastościanu foremnego, wielokrotnie pokryto lakierem nitrocelulozowym. Niedokładności wynikające z metody lakierowania spowodowały odchylenia kształtu modelu od kształtu bryły foremnej, przez co przetworniki nie znajdowały się dokładnie w osiach symetrii i nie były umieszczone pod takimi samymi kątami, co wywołało nierównomierności w charakterystykach kierunkowości badanego obiektu. W momencie wykonywania modelu nie zostały zebrane wszystkie dane dotyczące pojedynczych przetworników, w prototypie wykorzystano więc przetworniki o rozmiarze 22 mm (późniejsze badania wykazały lepsze przenoszenie niskich częstotliwości przez większe elementy przy zachowaniu dobrej pracy w wysokich częstotliwościach). Ostateczny wygląd prototypu przedstawia rysunek 7. Przyszłe prace zakładają sprawdzenie działania większych głośników oraz wpływu elastyczności obudowy na pracę źródła – ze względu na użycie papierowego szkieletu i lakieru nitrocelulozowego użyta obudowa jest dość elastyczna.



Rys. 7. Prototypowe wszechkierunkowe źródło piezoelektryczne

4. POMIARY

Do pomiarów kierunkowości prototypowego źródła dźwięku użyto tego samego sprzętu co przy pomiarach pasma przenoszenia pojedynczych przetworników. Do wykonania pomiarów kierunkowości wykorzystano zainstalowany w komorze bezchowej, sterowany automatycznie stolik obrotowy. Dokonano pomiarów kierunkowości w zakresie 800–40 000 Hz w pasmach tercjowych z krokiem 1° , mierząc poziom ciśnienia akustycznego w odległości 1 m od badanego źródła.

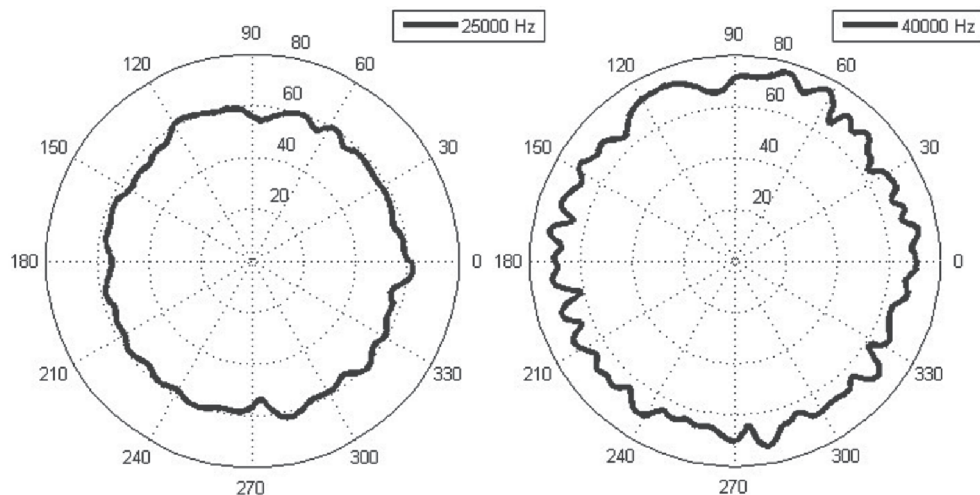
W tabeli 1 zebrane zostały zmierzone wartości oraz wybrane wyliczenia funkcji statystycznych dla wszystkich pasm tercjowych objętych zakresem pomiarowym. Prezentowane jest odchylenie standardowe pomiaru rzeczywistego oraz odchylenie po wygładzeniu charakterystyki w maksymalnym, dopuszczanym przez normę PN-EN ISO 3382-3:2012 stopniu, gdyż w ten sposób oceniane są komercyjne rozwiązania istniejące na rynku. Gdyby przyjąć zastosowanie wymogów normy do pomiarów w skali, prototypowe źródło prezentowane w niniejszym rozdziale spełnia jej wymogi w całym badanym spektrum częstotliwości.

Największą trudnością w wykonywaniu źródeł wszechkierunkowych jest zachowanie odpowiedniej charakterystyki w wysokich częstotliwościach. W prezentowanym prototypie problemem jest natomiast generacja niskich częstotliwości i zachowanie kierunkowości w zakresie częstotliwości średnich. Większość tych problemów prawdopodobnie uda się wyeliminować, natomiast uzyskanie wyników prezentowanych na wykresach kierunkowości w najwyższych, także ultradźwiękowych częstotliwościach (rys. 8), uznano za sukces badań wstępnych i dobry materiał do dalszych prac nad projektem.

Tabela 1

Wyniki pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego dla prototypu w pasmach 1/3 oktawy

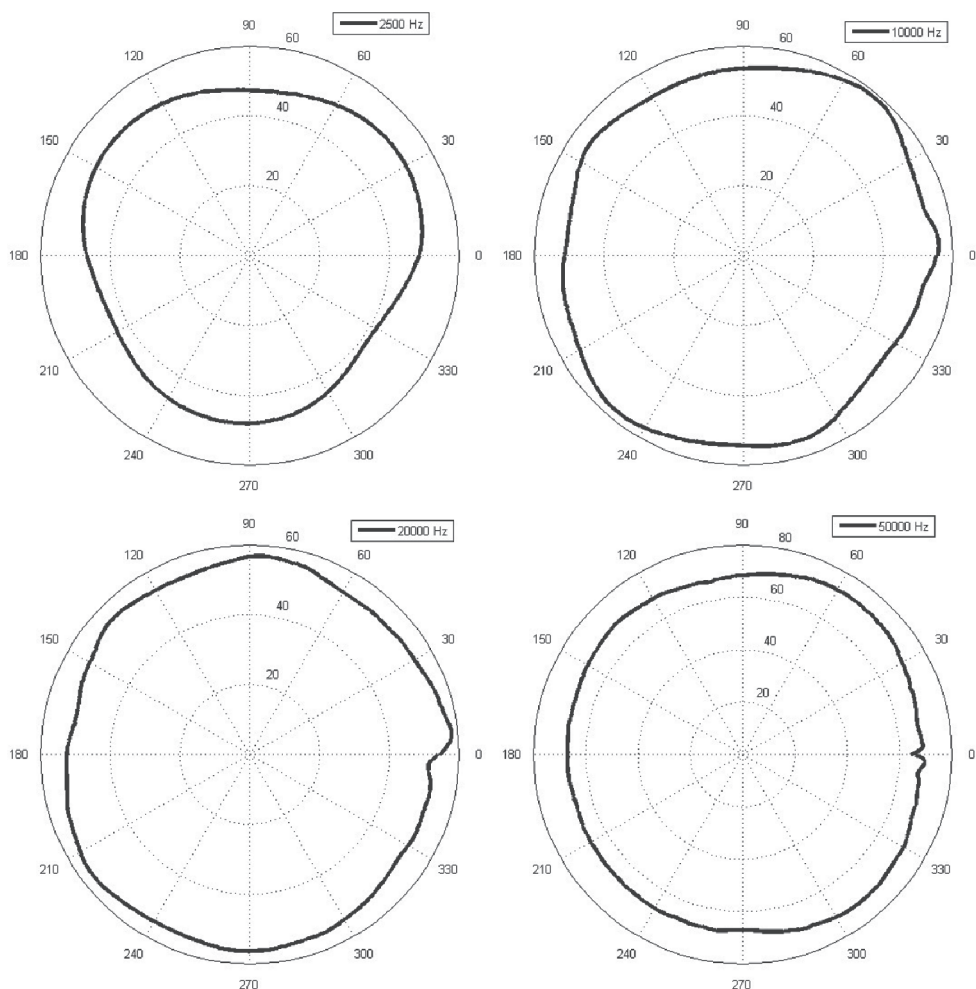
Częstotliwość [Hz]	Średni poziom L_p [dB]	Min. poziom L_p [dB]	Maks. poziom L_p [dB]	Różnica [dB]	Odchylenie standardowe	Odchylenie standardowe (wygładzone)
800	37,5	33,0	40,6	7,6	1,6	1,4
1000	36,7	32,8	40,2	7,4	1,5	1,3
1250	35,9	31,3	40,1	8,8	2,2	2,1
1600	36,0	32,8	38,3	5,5	1,5	1,4
2000	37,2	32,0	41,9	9,9	2,5	2,4
2500	47,6	40,7	52,2	11,5	3,1	2,8
3150	55,3	50,3	60,9	10,6	3,2	3,0
4000	60,1	52,9	65,7	12,8	3,5	3,4
5000	58,9	51,1	64,3	13,2	3,6	3,2
6300	57,6	48,9	63,3	14,4	3,1	2,6
8000	54,2	43,2	59,7	16,5	3,0	2,4
10 000	54,0	46,2	60,2	14,0	2,9	2,2
12 500	52,7	45,9	58,5	12,6	2,7	2,4
16 000	50,9	44,9	55,2	10,3	2,5	2,4
20 000	54,6	47,3	59,9	12,6	2,3	1,6
25 000	58,1	54,0	62,6	8,6	1,8	1,1
31 500	64,8	58,4	72,6	14,2	2,5	1,4
40 000	68,8	61,1	76,3	15,2	2,9	1,8



Rys. 8. Wykresy wartości poziomu ciśnienia akustycznego w zależności od kąta pomiaru

5. ANALIZA WYNIKÓW I PODSUMOWANIE

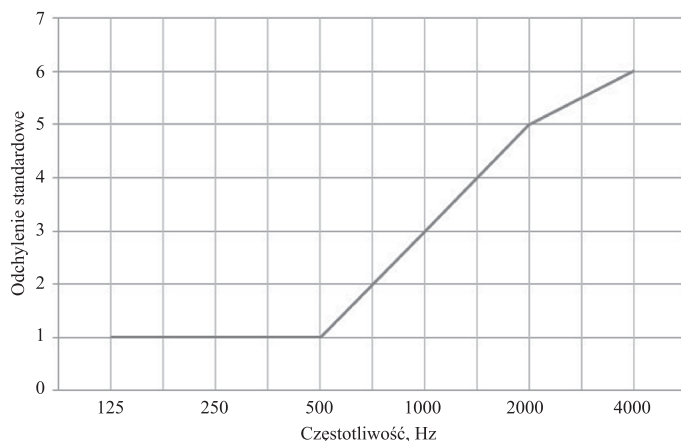
Otrzymane wyniki oceniono jako bardzo dobre i w pełni kwalifikujące źródło do pomiarów akustycznych w skali (rys. 9). Przy analizie poziomów ciśnienia akustycznego należy pamiętać o małej kubaturze pomieszczenia, w którym źródło będzie pracować, więc otrzymane poziomy (przy maksymalnym wzmacnieniu przez wzmacniacz i średnim wysterowaniu generatora szumu) są wystarczające dla modelu komory pogłosowej.



Rys. 9. Wygładzone wykresy kierunkowości

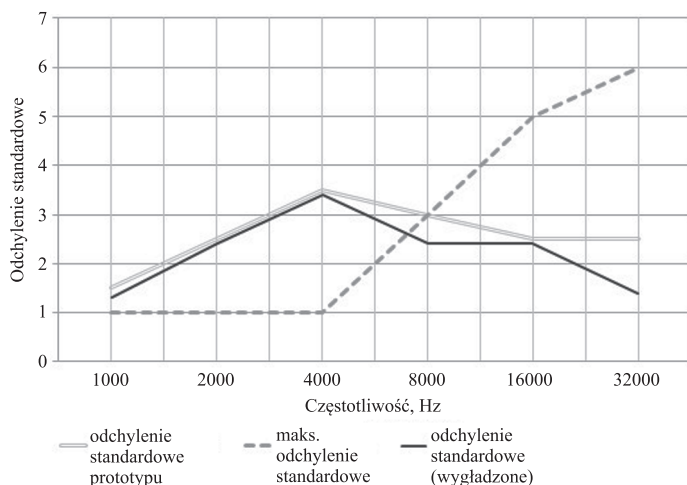
Ze względu na brak normy określającej wymagania względem źródeł stosowanych do akustycznych pomiarów w skali, jedyną możliwością oceny jakości źródła i jego

przydatności w pomiarach jest odwołanie do norm obowiązujących dla sprzętu standardowego rozmiaru, np. normy PN-EN ISO 3382-3:2012 określającej maksymalne dopuszczalne odchylenie standardowe w zakresie 125–4000 Hz (rys. 10).



Rys. 10. Maksymalne odchylenie standardowe kierunkowości dla źródła według normy PN-EN ISO 3382-3:2012

We wstępnej ocenie jakości źródła porównano rzeczywiste oraz wygładzone wartości odchylenia standardowego dla pomiarów kierunkowości. Na osi częstotliwości zastosowano wartości odpowiednio przemnożone przez współczynnik skali modelu.

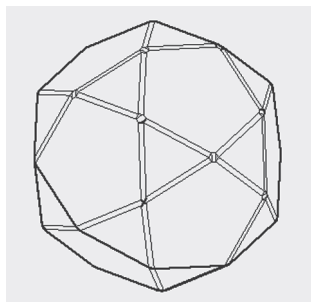


Rys. 11. Zestawienie wygładzonych i rzeczywistych wartości odchylenia standardowego dla prototypu

Na rysunku 11 widać przekroczenie zalecanych przez normę wartości w zakresie niższych częstotliwości, należy jednak pamiętać o istotnym wzroście kierunkowości rozchodzenia się dźwięku dla częstotliwości wysokich, przez co porównanie nie może być traktowane jako jednoznaczne kryterium dyskwalifikujące. Odchylenia w charakterystykach kierunkowości spowodowane są w większości niedopasowaniem impedancyjnym użytych piezoelementów, mocno zróżnicowaną charakterystyką częstotliwościową oraz nieregularnym kształtem obudowy. W przyszłości planowane jest usunięcie tych wad, co powinno znacznie zmniejszyć wartość odchylenia standardowego we wszystkich pasmach częstotliwości.

6. PRZYSZŁE PRACE

Dotychczas prezentowane wyniki mają charakter badań wstępnych, mających dostarczyć wymagane informacje potrzebne do skonstruowania modelu finalnego. Został przygotowany model ściętego dwunastościanu (dwudziesto-dwunastościan, rys. 12), który zostanie wykonany w technologii druku 3D – usunięte zostaną wady wynikające z nieregularności kształtu.



Rys. 12. Szkic obudowy zaprojektowanej dla źródła

Przedstawiono również rozwiązanie dla dużej różnicy impedancji i częstotliwości rezonansowych badanych przetworników. Za pomocą oprogramowania Brüel & Kjær Pulse i dołączonej do niego karty pomiarowej wykonano wiele pomiarów impedancji. Wykorzystując metodę dodanej masy znaną z metodyki wyznaczania parametrów Thiele'a-Smalla dla głośników, przesuwano rezonans dla jednego z dwóch przetworników testowych tak, aby dopasować go do rezonansu drugiego przetwornika. Osiągnięte rezultaty pozwalają stwierdzić skuteczność tej metody. Przy budowie finalnego źródła planowane jest użycie dwunastu dopasowanych impedancyjnie i rezonansowo przetworników, co powinno zmniejszyć wpływ interferencji destrukcyjnej przy pomiarach kierunkowości i poprawić jakość źródła.

Ostatnim etapem kształtowania charakterystyki źródła wszechkierunkowego jest system wielokanałowej filtracji cyfrowej. Każdy z użytych dwunastu przetworników piezoelektrycznych, już po dopasowaniu częstotliwości rezonansowych, został poddany szczegółowemu badaniu charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej.

Na tej podstawie, dla każdego przetwornika osobno, został zaprojektowany filtr cyfrowy mający na celu maksymalne wyrównanie pasma przenoszenia przetwornika w zakresie częstotliwości 800–40 000 Hz ze szczególnym uwzględnieniem wzrostu amplitudy dla częstotliwości rezonansowej. Do projektowania filtrów użyto środowiska programistycznego GNU Octave wraz ze specjalistycznym pakietem służącym do cyfrowego przetwarzania sygnałów. Proces projektowania filtru składa się z następujących kroków:

- 1) podanie na przetwornik sygnału szumu białego i nagranie pliku dźwiękowego w formacie .wav (częstotliwość próbkowania 192 kHz),
- 2) poddanie pliku dźwiękowego transformacji Fouriera w celu uzyskania charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej, następnie jej wygładzenie przy użyciu filtru Savitzky'ego–Golaya,
- 3) zaprojektowanie filtru cyfrowego (przy użyciu wbudowanego polecenia „fir2”) o zadanej charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej, którą jest odwrócona charakterystyka uzyskana w poprzednim kroku, otrzymane w ten sposób współczynniki filtru są zapisywane w celu dalszego wykorzystania; warto zauważyć, że użyte filtry są filtrami o skończonej odpowiedzi impulsowej, więc nie wprowadzają zaburzeń fazy.

Zaprojektowane filtry zostaną przekazane do systemu generującego sygnał pomiarowy opartego na środowisku LabVIEW, po jednym kanale na każdy przetwornik, który stosuje odpowiedni dla danego egzemplarza filtr korygujący niedoskonałości charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej. Tym sposobem sygnał pomiarowy generowany przez źródło wszechkierunkowe będzie maksymalnie zbliżony do zadanego sygnału wejściowego, zminimalizowany zostanie wpływ niedoskonałości fizycznych pojedynczych przetworników piezoelektrycznych.

Zastosowanie opisanych czynności pozwoli na poprawienie pracy proponowanego rozwiązania i bezpośrednio wpłynie na poprawę charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych, fazowych i kierunkowych.

LITERATURA

- [1] Dobrucki A., Żółtogórski B., Pruchnicki P., Bolejko R.: Sound absorbing and insulating enclosures for ultrasonic range, *Archives of Acoustic*, 2010, 35, 2, 157–164
- [2] Dungen van den F.: *Acoustique des Salles*, Paris 1934
- [3] Baruch K., Kamisiński T.: Metodyka kompensacji wilgotności względnej powietrza przy pomiarze współczynnika pochłaniania dźwięku w fizycznym modelu komory pogłosowej, *Postępy akustyki* 2015, Monografia LXII otwartego seminarium z akustyki: Świeradów-Zdrój, 7–11 września 2015, 427–438
- [4] Ikeda T.: *Fundamentals of piezoelectricity*, Oxford 1996
- [5] Dobrucki A.: *Zasady działania przetworników elektromechanicznych*, w: Dobrucki A.: *Przetworniki elektroakustyczne*, Warszawa 2007, 205–218
- [6] Dragan D.: Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics, *Reports on Progress in Physics*, 1998, 61, 9, 1267–1324
- [7] Kochervinskii V.: Piezoelectricity in crystallizing ferroelectric polymers, *Crystallography Reports*, 2003, 48, 4, 649–675

WPŁYW METODY POMIARÓW NA OCENĘ IZOLACYJNOŚCI AKUSTYCZNEJ PRZEGRODY

Verification of methods used to assess airborne sound
insulation at low frequencies

India KAPTAN, Agata SZELĄG

Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Lądowej,
india.kaptan@gmail.com

STRESZCZENIE

Do jednych z obowiązków projektanta należy zapewnienie wymaganych izolacyjności akustycznych przegród budowlanych. Wytyczne te zostały szczegółowo sprecyzowane w normie PN-B-02151-3:2015-10 [1]. Po wybudowaniu budynku parametry akustyczne przegród są weryfikowane na podstawie wyników badań terenowych. Dotychczas pomiary takie przeprowadzano na podstawie wskazań zawartych w normie PN-EN ISO 140-4:2000 [2]. Dwa lata temu pojawiła się jednak kolejna norma, PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3], która wprowadza zmiany w metodyce pomiaru izolacyjności akustycznej przegród w warunkach in situ, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości. W pracy przedstawiono wpływ metody pomiarowej na ocenę izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych przegród budowlanych, dokonanej na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych zgodnie z obydwoma omawianymi normami.

ABSTRACT

One of the responsibilities of the designer is to ensure the required acoustic insulation of building partitions. These guidelines have been thoroughly defined in the standard PN-B-02151-3:2015-10 [1]. In the constructed building the acoustic parameters of partitions are verified based on the results obtained from field measurements. So far, such measurements were carried out on the basis of indications included in the standard PN-EN ISO 140-4:2000 [2]. However, another standard, i.e. PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3], has been recently introduced. It makes changes in the methodology for a field measurement of airborne sound insulation of building partitions, especially in the low frequency range. The paper presents the influence of the measurement method to assess the acoustic insulation of building partitions based on the results obtained from measurements carried out in accordance with both types of standards.

1. WPROWADZENIE

Izolacyjność akustyczna od dźwięków powietrznych dla przegród budowlanych określana jest za pomocą wskaźnika izolacyjności akustycznej R wyrażonej w decybelach. Parametr ten określa zdolność badanej przegrody do ograniczania przenikania dźwięku z jednego pomieszczenia do drugiego. Wskaźnik izolacyjności akustycznej jest wartością zależną od częstotliwości dźwięku i można go wyznaczyć na podstawie następującej formuły:

$$R(f) = L_1(f) - L_2(f) + \log \frac{S}{A} \quad (1)$$

gdzie:

$L_1(f)$ – poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym [dB],

$L_2(f)$ – poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym [dB],

S – powierzchnia przegrody rozdzielającej [m^2],

A – równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej pomieszczenia odbiorczego [m^2].

Na podstawie wskaźnika izolacyjności akustycznej $R(f)$ wyznaczany jest jednolicebnowy wskaźnik ważony izolacyjności od dźwięków powietrznych R_w . Jest to wartość w decybelach odczytana dla częstotliwości 500 Hz na krzywej odniesienia po przesunięciu jej zgodnie z metodą określoną w normie PN-EN ISO 717-1:2013-08 [4]. Aby dodatkowo uwzględnić charakterystykę widma hałasu, do wartości jednolicebnowego wskaźnika ważonego izolacyjności akustycznej dodawane są widmowe wskaźniki adaptacyjne C oraz C_w . W konsekwencji otrzymujemy nowe wskaźniki izolacyjności akustycznej przegrody, tj. odpowiednio R_{A1} oraz R_{A2} . W przypadku pomiarów w warunkach in situ należy uwzględnić również obniżenie izolacyjności akustycznej wskutek wpływu przenoszenia bocznego dźwięku. Ostatecznie otrzymujemy wskaźniki przybliżone opisane symbolami R'_{A1} i R'_{A2} .

Metodyka terenowych pomiarów izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych dla przegród budowlanych została znormalizowana. Dzięki temu parametry akustyczne przegrody, mierzone wielokrotnie nawet przez różne zespoły badawcze, są możliwe do porównania. Dotychczas pomiary takie przeprowadzano, opierając się na wskazaniach normy PN-EN ISO 140-4:2000 [2]. Dwa lata temu pojawiła się jednak nowa norma, PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3], która wprowadziła zmiany w metodzie pomiaru izolacyjności akustycznej przegród, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości.

Przyczyną wspomnianych zmian jest fakt, że wyniki pomiarów parametrów akustycznych przegrody w przypadku, gdy długość fali jest zbliżona do odległości między ścianami pomieszczenia, obarczone są bardzo dużym błędem. Wpływ na to mają występujące tzw. mody drgań pomieszczenia i związane z nimi rezonans akustyczny. Chcąc zdefiniować zjawisko, rozpatrzmy pole akustyczne w pomieszczeniu jako układ nakładających się na siebie fal akustycznych, tj. fali bezpośredniej biegnącej ze źródła, oraz fal odbitych [5]. Do odbicia fali akustycznej dochodzi, gdy fala napotyka na przeszkodę, np. na ścianę lub inny obiekt znajdujący się w pomieszczeniu. Część fali zostaje wówczas pochłonięta przez przeszkodę, a część zostaje od niej odbita. Zjawisko istnienia fal bezpośrednich i odbitych prowadzi do ich interferencji. Istnieją dwa rodzaje interferencji: konstruktywna i destruktywna. Interferencja konstruktywna polega na wzmocnieniu fali i zachodzi, gdy nakładające się fale akustyczne są zgodne w fazie, czyli gdy grzbiety i doliny fal się pokrywają. Wynikiem interferencji konstruktywnej jest fala o zwiększonej amplitudzie. Interferencja destruktywna charakteryzuje się wygaszeniem fali. Interferujące fale są przeciwne w fazie, czyli grzbiety i doliny fal nie pokrywają się. Wynikiem interferencji jest fala o obniżonej amplitudzie. Omawiane rodzaje interferencji zilustrowano na rysunku 1.

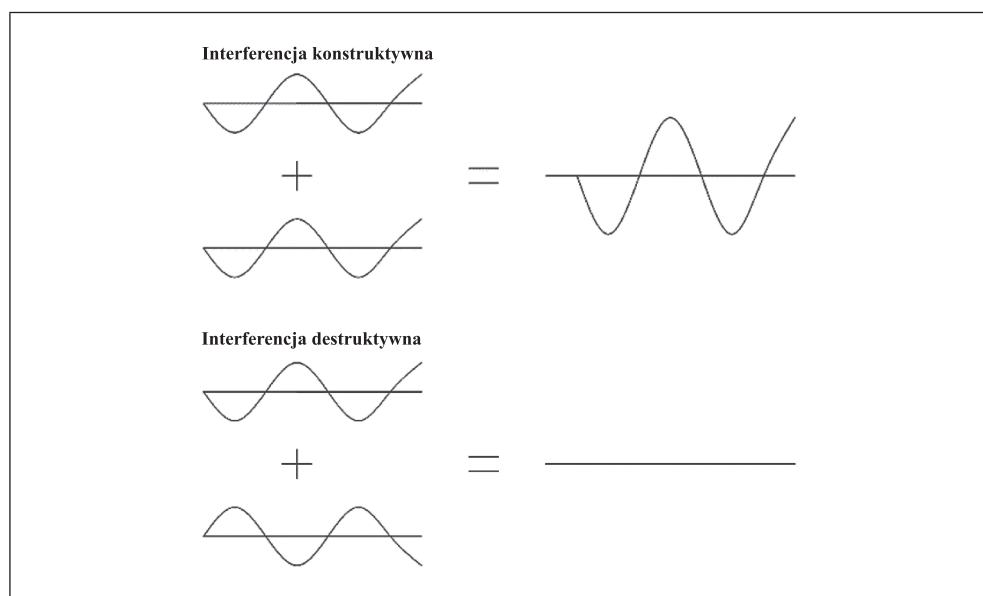
Szczególnym przypadkiem interferencji jest fala stojąca, która powstaje z nałożenia się dwóch fal poruszających się w tym samym kierunku, lecz o przeciwnych zwrotach. Miejsca, w których amplituda fali jest zerowa, nazywane są węzłami fali stojącej. Miejsca, w których amplituda fali osiąga maksymalną wartość, nazywane są strzałkami. Opisane zjawisko określane jest jako rezonans. Zbiór rezonansów pomieszczenia nazywany jest modami.

Mody pomieszczenia wyznacza się na podstawie następującej formuły [5]:

$$f_{K,L,M} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{K}{X}\right)^2 + \left(\frac{L}{Y}\right)^2 + \left(\frac{M}{Z}\right)^2} \quad (2)$$

gdzie:

- $f_{K,L,M}$ – częstotliwość fali stojącej [Hz],
- K, M, L – kolejne liczby naturalne,
- X, Y, Z – wymiary pomieszczenia [m],
- c_0 – prędkość fali dźwiękowej w powietrzu [m/s].



Rys. 1. Rodzaje interferencji fal akustycznych

Występowanie modów drgań pomieszczenia stanowi problem podczas pomiarów wykonywanych w celu określenia parametrów akustycznych przegród budowlanych. Strzałki i węzły fal stojących wpływają bowiem na poziom ciśnienia akustycznego dźwięków o niskich częstotliwościach (tj. gdy długość fali jest zbliżona do odległości między ścianami pomieszczenia), w związku z czym nie dokonuje się pomiaru rzeczywistego poziomu dźwięku, lecz dźwięku wzmocnionego bądź wygaszonego. Metodyka badań zaproponowana w normie PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3] ma na celu zminimalizowanie wpływu tego zjawiska i zwiększenie dokładności pomiarów w zakresie niskich częstotliwości. Jest jednak dużo bardziej czasochłonna niż metoda określona w normie PN-EN ISO 140-4:2000 [2]. Stąd pojawia się pytanie o wpływ zastosowanej metodyki pomiarów na końcowe wyniki badań.

2. PORÓWNANIE NORM PN-ISO 140-4:2000 ORAZ PN-EN ISO 16283-1:2014-05

Procedura pomiarowa izolacyjności akustycznej właściwej przybliżonej R' dla zakresu częstotliwości od 100 Hz do 5000 Hz jest jednakowa w przypadku obu analizowanych norm, tj. PN-EN ISO 140-4:2000 [2] i PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3]. Bazuje ona na pomiarze tła akustycznego i czasu pogłosu w pomieszczeniu odbiorczym oraz poziomemu ciśnieniu akustycznego w pomieszczeniu nadawczym i odbiorczym, dla co najmniej pięciu punktów pomiarowych w przypadku każdego z minimum dwóch położen źródła dźwięku. Różnice w normach pojawiają się natomiast w metodyce pomiaru izolacyjności akustycznej w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 80 Hz. Zgodnie z PN-EN ISO 140-4:2000 [2] procedura pomiarowa dla niskich częstotliwości jest podobna jak w przypadku procedury dla podstawowego zakresu częstotliwości. Należy jednak zwiększyć liczbę punktów pomiarowych, położen źródła oraz wydłużyć czas uśredniania pojedynczego pomiaru. Natomiast zgodnie z normą PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3], oprócz standardowej procedury, należy wykonać dodatkowe pomiary w narożach pomieszczenia. W tabeli 1 zestawiono podstawowe wytyczne do pomiaru izolacyjności akustycznej przegrody dla częstotliwości poniżej 100 Hz według obu norm.

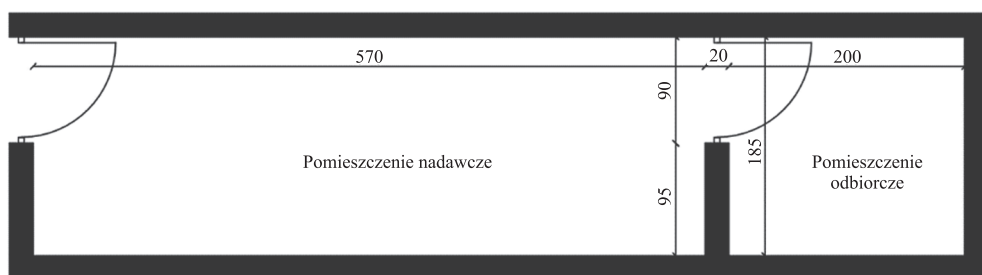
Tabela 1

Porównanie metod pomiaru izolacyjności akustycznej przegród wewnętrznych od dźwięków powietrznych według norm PN EN ISO 140-4:2000 [2] i PN EN ISO 16283-1:2014-05 [3]

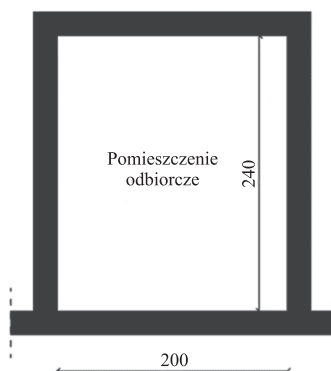
Przedmiot porównania	PN-EN ISO 140-4:2000	PN-EN ISO 16283-1:2014-05
Pozycje pojedynczego źródła dźwięku	Liczba pozycji źródła powinna zostać zwiększona w stosunku do procedury standardowej do co najmniej trzech	Dwie pozycje źródła niezależnie od mierzonego zakresu częstotliwości
Pozycje odbiornika	Liczba pozycji mikrofonu powinna być większa niż w procedurze standardowej. Pomiar w polu rozproszonym	Pierwszy cykl pomiarowy należy wykonać według procedury standardowej. Następnie przeprowadza się dodatkowy cykl pomiarowy w narożach pomieszczenia: cztery pozycje mikrofonu dla każdej pozycji głośnika – dwa narożniki na poziomie sufitu, dwa na poziomie posadzki; mikrofony w odległości od 0,3 m do 0,4 m od płaszczyzn tworzących dany narożnik
Czas uśredniania	Co najmniej 15 s	Co najmniej 15 s

3. PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań były drzwi wewnętrzne o wymiarach 90 cm × 200 cm rozdzielające dwa pomieszczenia, z których jedno było pomieszczeniem nadawczym, drugie odbiorczym. Odpowiedni rzut pomieszczeń z wymiarami przedstawia rysunek 2. Wysokość pomieszczeń wynosiła 2,40 m (rys. 3). W konsekwencji kubatura pomieszczenia odbiorczego była równa 8,88 m³, co zgodnie z normami wymuszało specjalną procedurę pomiarową w zakresie częstotliwości poniżej 100 Hz. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono dodatkowo widok obu analizowanych pomieszczeń.



Rys. 2. Rzut pomieszczenia nadawczego i odbiorczego



Rys. 3. Przekrój pomieszczenia odbiorczego

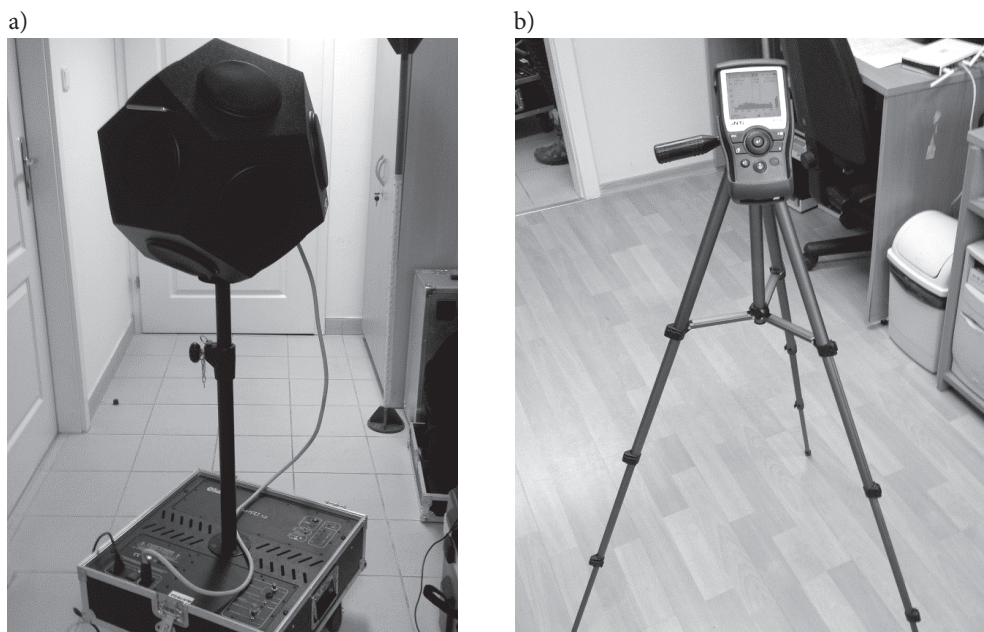
Pomiary poziomów ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym i odbiorczym oraz tła w pomieszczeniu odbiorczym zostały wykonane przy użyciu analizatora dźwięku NTI XL2 z mikrofonem pomiarowym. Jako źródło dźwięku wykorzystano pojedynczy głośnik wszechkierunkowy z generatorem szumu. Aparaturę pomiarową przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 4. Pomieszczenie nadawcze



Rys. 5. Pomieszczenie odbiorcze



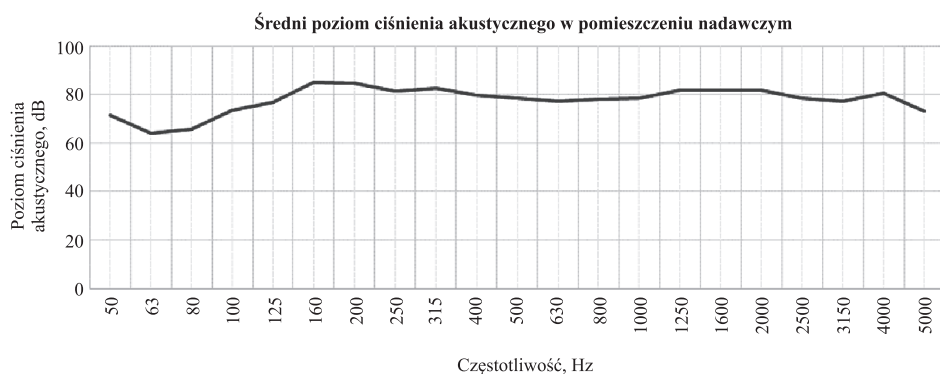
Rys. 6. Wszechkierunkowe źródło dźwięku z generatorem szumu (a); analizator dźwięku z mikrofonem pomiarowym (b)

4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Badania izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych dla drzwi zostały przeprowadzone zgodnie z analizowanymi normami, tj. PN-EN ISO 140-4:2000 [2] i PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3]. W pierwszym etapie dokonywano pomiarów w pomieszczeniu nadawczym. Rysunek 7 przedstawia uśredniony poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym dla rozszerzonego zakresu częstotliwości, czyli od 50 Hz do 5000 Hz.

Następnie zmierzono poziom tła akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym, a wartości uzyskane z pomiarów uśredniono oddzielnie dla punktów znajdujących się w polu rozproszonym oraz punktów zlokalizowanych w narożach. Uzyskane charakterystyki przedstawiono na rysunku 8.

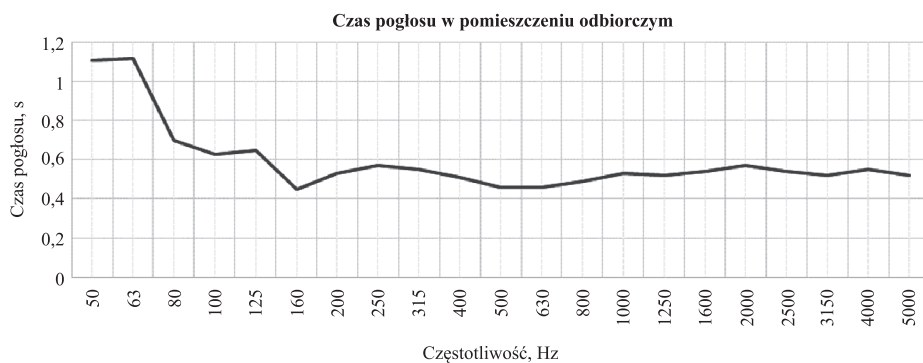
W celu uwzględnienia chłonności akustycznej pomieszczenia odbiorczego wykonano pomiar czasu pogłosu, stosując metodę impulsową. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 9. Następnie zmierzono poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym zgodnie z procedurą podstawową oraz wykonano dodatkowe pomiary, opierając się na wytycznych dla badań w zakresie niskich częstotliwości. Uśrednione charakterystyki poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości, dla punktów znajdujących się w polu rozproszonym oraz punktów zlokalizowanych w narożach, zaprezentowano na rysunku 10.



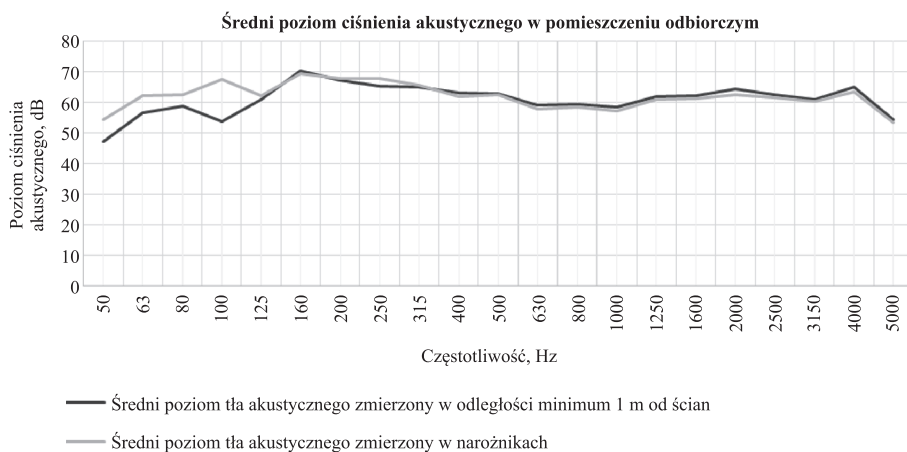
Rys. 7. Średni poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym



Rys. 8. Poziom tła akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym

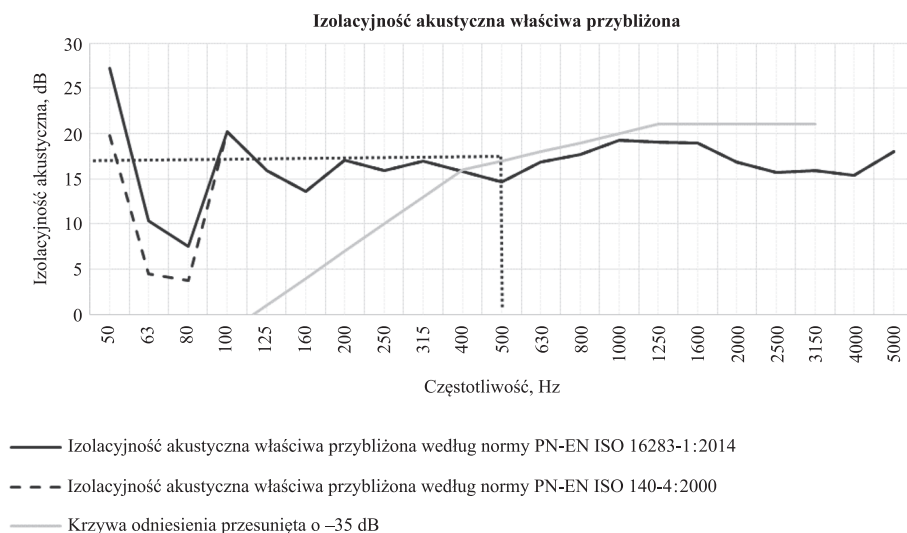


Rys. 9. Czas pogłosu w pomieszczeniu odbiorczym



Rys. 10. Średni poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym

Bazując na wynikach uzyskanych w badaniach, wyznaczono izolacyjność akustyczną właściwą przybliżoną R' dla analizowanej przegrody. Obliczenia przeprowadzono, uwzględniając wytyczne zawarte w normach PN-EN ISO 140-4:2000 [2] i PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3]. Następnie zgodnie z normą PN-EN ISO 717-1:2013-08 [4] określono wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej przybliżonej R'_w oraz wskaźniki adaptacyjne dla obu otrzymanych charakterystyk. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 11 oraz w tabeli 2.



Rys. 11. Izolacyjność akustyczna właściwa przybliżona

Tabela 2

Porównanie wskaźników izolacyjności akustycznej oraz wskaźników adaptacyjnych uzyskanych na podstawie wyników badań przeprowadzonych zgodnie z dwoma normami [2, 3]

Wskaźnik	PN-EN ISO 140-4:2000	PN-EN ISO 16283-1:2014-05
R_w'	17	17
C	0	0
C_{tr}	0	0
$C_{50-3150}$	0	-1
$C_{tr,50-3150}$	0	-1
$C_{50-5000}$	0	0
$C_{tr,50-5000}$	0	-1

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wpływ metody pomiarowej na ocenę izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych przegród budowlanych na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych zgodnie z normami PN-EN ISO 140-4:2000 [2] i PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3]. Na podstawie wykonanych badań określono charakterystykę izolacyjności akustycznej właściwej przybliżonej analizowanej przegrody, a następnie wyznaczono wskaźniki izolacyjności i wskaźniki adaptacyjne. Analizując wykres izolacyjności akustycznej R' (rys. 11), można zauważyć rozbieżności w uzyskanych wynikach wynoszące od 3 dB do 8 dB w zakresie niskich częstotliwości. Jednak różnice te nieznacznie przekładają się na wartości wskaźników adaptacyjnych (tab. 2), otrzymanych na podstawie wyników pomiarów wykonanych zgodnie z obydwoma normami.

Bazując na wynikach przeprowadzonych badań, można stwierdzić, że metodyka pomiarów izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych określona w normach PN-EN ISO 140-4:2000 [2] i PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [3] miała w analizowanym przypadku nieznaczny wpływ na końcowe wyniki zmierzonych parametrów akustycznych przegrody. W obliczeniach inżynierskich można by tę różnicę uznać za pomijalnie małą.

LITERATURA

- [1] PN-B-02151-3:2015-10 – Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych
- [2] PN-EN ISO 140-4:2000 – Akustyka – Pomiar izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Pomiar terenowe izolacyjności od dźwięków powietrznych między pomieszczeniami

- [3] PN-EN ISO 16283-1:2014-05 – Akustyka – Pomiary terenowe izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych
- [4] PN-EN ISO 717-1:2013-08 – Akustyka – Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych
- [5] Kulowski A.: Akustyka sal. Zalecenia projektowe dla architektów, Gdańsk 2011

**ANALIZA HAŁASU
GENEROWANEGO
PODCZAS ROZPAKOWYWANIA CUKIERKÓW**

Analysis of the drops unwrapping noise

**Teresa MAKUCH, Szymon DUDZIŃSKI, Zuzanna KUSAL,
Adam PILCH, Julitta BARTOLEWSKA, Marcjanna CZAPLA**

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

STRESZCZENIE

Częstym problemem w salach koncertowych są słuchacze, którzy przeszkadzają innym użytkownikom w odbiorze muzyki, hałasując. Jednym z przykładów takich zachowań jest rozpakowywanie cukierków w sytuacji, gdy przeziębieni słuchacze chcą ograniczyć kaszel. Przedmiotem pracy jest analiza porównawcza podstawowych parametrów akustycznych dźwięków powstających przy rozpakowywaniu cukierków w celu określenia hałasu, jaki mogą generować, i jego uciążliwości dla innych użytkowników sal koncertowych. W komorze bezchłowej nagrano dźwięki towarzyszące wyjmowaniu cukierków z opakowań wykonanych z różnych materiałów. Zbadano generowane poziomy dźwięku oraz porównano zarejestrowane widma z wybranymi fragmentami nagrań muzyki. Na podstawie otrzymanych wyników oraz przeprowadzonej ankiety podjęto próbę określenia parametrów, dla których hałas jest uznawany za uciążliwy.

ABSTRACT

A frequent problem in concert halls are listeners who distract others from listening to music by creating noise. An example of such behaviour is unwrapping cough drops by some of the listeners. The report's subject is a comparative analysis of crucial acoustic parameters of various drops' wrappings in order to determine the noise they can generate and the discomfort it causes. The sounds generated during unpacking the drops out of the wrappings made of different materials were recorded in the anechoic chamber. The recordings were analysed in order to locate the given sound in the audible frequency band in relation to musical sounds. Basing on the results and the survey carried out, an attempt was made to specify parameters of the noise perceived as distractive.

1. PROBLEMATYKA

Na co dzień trudno całkowicie wyeliminować towarzyszące nam niepożądane dźwięki i stworzyć idealne warunki do słuchania muzyki. Za namiastkę takiej sytuacji można uznać koncert – w szczególności muzyki klasycznej, gdzie klarowność przekazu dźwiękowego i relatywnie niski poziom tła akustycznego mają duże znaczenie dla komfortu odbioru muzyki przez słuchacza.

Jednak nawet podczas koncertu zdarza się, że przekaz muzyczny jest zakłócany przez zewnętrzne bodźce dźwiękowe [1]. Dopuszczalne poziomy dźwięku są precyzyjnie określone w normie PN-B-02151-02:1987 [2]. Norma dotyczy jednak dźwięków mających źródło poza budynkiem (m.in. hałas komunikacyjny) oraz dźwięków związanych z pracą urządzeń technicznych (np. szum wentylatorów). Rzadko uwzględnia się hałas generowany przez zebraną na koncercie publiczność, który także ma wpływ na odbiór muzyki [3].

Do zakłócających przebieg koncertu odgłosów pochodzących od słuchaczy należą m.in. dzwonek telefonu komórkowego, szept, szelest ubrania podczas zmiany pozycji na fotelu, a także kaszel i szelest papierków po cukierkach (najczęściej mających temu kaszlowi czy bólowi gardła zapobiegać). Wpływ powyższych zakłóceń na percepcję przekazu muzycznego nie został dotychczas szczegółowo zbadany.

2. METODYKA BADAŃ

2.1. PRÓBA POMIAROWA

Ze względu na różnorodność opakowań dostępnych cukierków wybrano jedenaście produktów w różnych opakowaniach, wykonanych z różnych materiałów (tab. 1).

Tabela 1

Charakterystyka badanych opakowań cukierków

Marka cukierka	Materiał opakowania	Sposób rozpakowywania
Verbena	plastikowa folia	rozwijanie
Eukaliptus	papier kredowy	rozwijanie
Ricola	kartonowe pudełko	wyjmowanie
Halls	papier kredowy	rozwijanie
Isla	plastik, aluminium	wyciskanie
Cholinex	plastik, aluminium	wyciskanie
Witamina C	plastikowa folia	rozwijanie
Ice	plastikowa folia	rozwijanie
Michałki	folia aluminiowa	rozwijanie
Mieszanka Krakowska	folia plastikowa, folia aluminiowa podklejona papierem	rozwijanie
Elfiki	folia aluminiowa	rozwijanie

2.2. OCENA OBIEKTYWNA

Dla każdej próbki wykonano cztery pomiary, polegające na rejestrowaniu za pomocą mikrofonów dźwięków towarzyszących rozpakowywaniu cukierka kolejno przez cztery różne osoby. W komorze bezchodowej zamodelowano fragment sali koncertowej. Na środkowym z pięciu ustawionych na planie krzyża foteli siedziała osoba rozpakowująca cukierki, z lewej i prawej strony oraz z tyłu umieszczone były mikrofony pomiarowe 1/2" GRAS 46AE, z przodu mikrofon niskoszumny 1" GRAS 40HF. Mikrofony zostały ustawione na wysokości uszu przeciętnego człowieka siedzącego na fotelu (1,2 m). Dźwięk rejestrowano jednocześnie ze wszystkich czterech kierunków w odległościach 0,9 m od osoby rozpakowującej, odpowiadających miejscom sąsiednim na widowni typowej sali koncertowej. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 1.

Dodatkowo w komorze pogłosowej wykonano pomiar mocy akustycznej, zgodnie z obowiązującą normą [4]. Dla wszystkich cukierków powtórzono rozpakowywanie przez te same cztery osoby.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe w komorze bezdechowej

2.3. OCENA SUBIEKTYWNA

Opierając się na wynikach oraz parametrach akustycznych sali koncertowej Filharmonii im. Karola Szymanowskiego w Krakowie [5], zasymulowano wpływ hałasu generowanego podczas rozpakowywania cukierków na odbiór muzyki przez nałożenie go na dwa utwory. Nagrania wykorzystano do internetowej ankiety, przeprowadzonej głównie wśród studentów i licealistów (72 respondentów, średnia wieku 23 lata). Zapytani oni zostali o doświadczenia koncertowe (częstotliwość udziału w koncertach, spostrzeżenia dotyczące czynników rozpraszających wymienionych w rozdziale 1) i wykształcenie muzyczne, jako elementy pozwalające w pewnym stopniu ocenić ich stosunek do muzyki i wrażliwość słuchu. Następnie, nie znając kryteriów, według których dobrane zostały nagrania, mieli za zadanie ocenić, jak bardzo towarzyszący muzyce hałas przeszkadza im w jej odbiorze.

3. ANALIZA WYNIKÓW

3.1. OCENA OBIEKTYWNA

Opierając się na wynikach pomiaru w komorze pogłosowej, wyznaczono średni poziom mocy akustycznej (L_{WA}) dla każdego cukierka w pasmach tercjowych od 100 Hz do 10 kHz.

Na podstawie nagrań z komory bezdechowej obliczono w pasmach tercjowych od 100 Hz do 20 kHz poziom ciśnienia akustycznego (L_{pA}), ekspozycyjny poziom dźwięku (L_{AE}) oraz maksymalny poziom ciśnienia akustycznego wyznaczony na podstawie stałej czasowej FAST (L_{Amax}), dalej określane zbiorczo jako „parametry akustyczne”. Wszystkie powyższe parametry zostały skorygowane krzywą A, aby podczas analizy uwzględnić

charakterystykę ludzkiego ucha. W celu dokładniejszego określenia, w jaki sposób badane dźwięki są odbierane przez człowieka, wyznaczono także parametr psychoakustyczny – głośność (*loudness*, N) [6].

Określone parametry akustyczne, posortowane rosnąco według poziomu dźwięku A, zestawiono w tabeli 2. Wyniki dla opakowań wawelskich Michałków oraz Mieszanki Krakowskiej przedstawiono w tabeli w charakterze poglądowym, w celu ukazania rozpiętości wyników. Wykluczono je natomiast z dalszej analizy, uwzględniając tylko cukierki twarde, mogące pomóc w złagodzeniu bólu gardła lub kaszlu.

Tabela 2

Wartości parametrów akustycznych i głośność dla poszczególnych opakowań cukierków

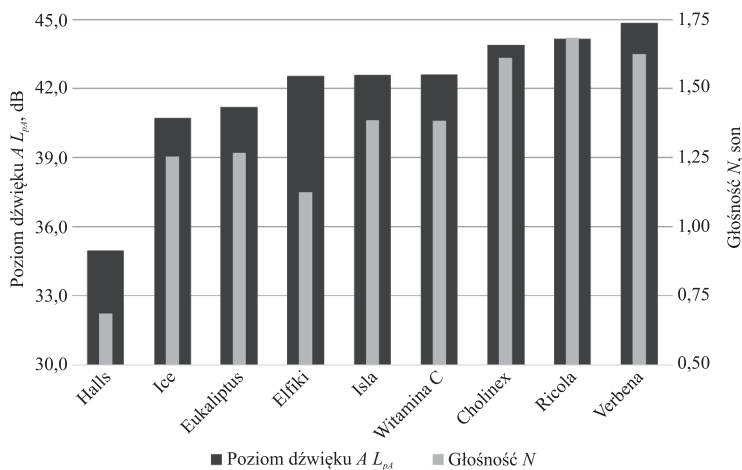
Marka cukierka	Poziom dźwięku A L_{pA} [dB]	Ekspozycyjny poziomy dźwięku A L_{AE} [dB]	Maksymalny poziomy dźwięku A L_{Amax} [dB]	Poziom mocy akustycznej A L_{WA} [dB]	Głośność N [son]
Halls	35,0	44,7	45,9	47,6	0,69
Ice	40,7	49,2	50,5	51,5	1,25
Eukaliptus	41,2	49,9	54,4	52,1	1,27
Elfiki	42,5	51,8	54,3	53,1	1,12
Isla	42,6	50,9	56,7	55,2	1,38
Witamina C	42,6	51,1	51,9	54,1	1,38
Cholinex	43,9	52,5	56,9	59,2	1,61
Ricola	44,2	52,7	57,9	57,1	1,68
Verbena	44,8	53,9	55,6	54,7	1,63
Mieszanka Krakowska	47,1	55,9	56,4	58,6	1,84
Michałki	47,8	56,7	56,4	60,4	2,07

Rozpakowywanie cukierków generuje dźwięki o zbliżonych poziomach ciśnienia akustycznego. Rozpiętość poziomu mocy akustycznej jest większa, należy jednak uwzględnić fakt, że dane te pochodzą z różnych pomiarów, a idealna powtarzalność czynności rozpakowywania cukierka przez tę samą osobę jest kwestią dyskusyjną.

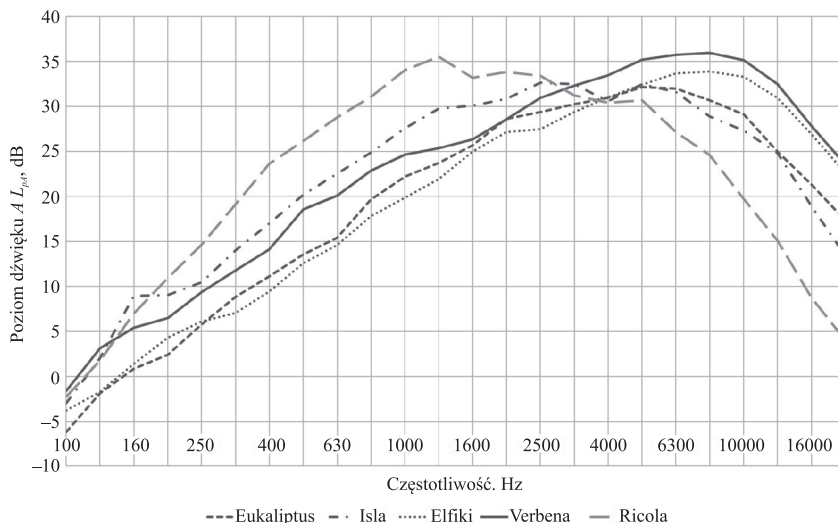
Na rysunku 2 przedstawiono porównanie wartości L_{pA} z głośnością N . Widma amplitudowo-częstotliwościowe dla pięciu wybranych opakowań cukierków przedstawiono na rysunku 3.

Widoczna na rysunku 2 nieliniowość zależności między obliczoną głośnością N a poziomem dźwięku L_{pA} ma różne przyczyny. Subiektywny odbiór głośności sygnału akustycznego zależy głównie od jego amplitudy, przebiegu czasowego oraz kształtu widma amplitudowo-częstotliwościowego [6]. Na rysunku 3 można zaobserwować różnice

w kształcie widm hałasu rozpakowywania cukierków Eukaliptus, Elfiki, Isla, Ricola oraz Verbena. Porównanie ich z wartościami głośności dla poszczególnych cukierków wskazuje, że przesunięcie widma w kierunku środkowych częstotliwości związane jest z większą głośnością. Dźwięk rozpakowywania cukierków Ricola charakteryzuje się dominacją częstotliwości ze środkowego pasma (1000–2500 Hz), podczas gdy Verbena osiąga najwyższe poziomy L_{pA} w zakresie 5000–10000 Hz, co wpłynęło na najwyższą głośność opakowania Ricola, mimo niższego poziomu ciśnienia akustycznego od Verbeny.



Rys. 2. Porównanie wartości L_{pA} oraz głośności N dla poszczególnych opakowań cukierków



Rys. 3. Widma amplitudowo-częstotliwościowe dla wybranych opakowań cukierków

3.2. OCENA SUBIEKTYWNA

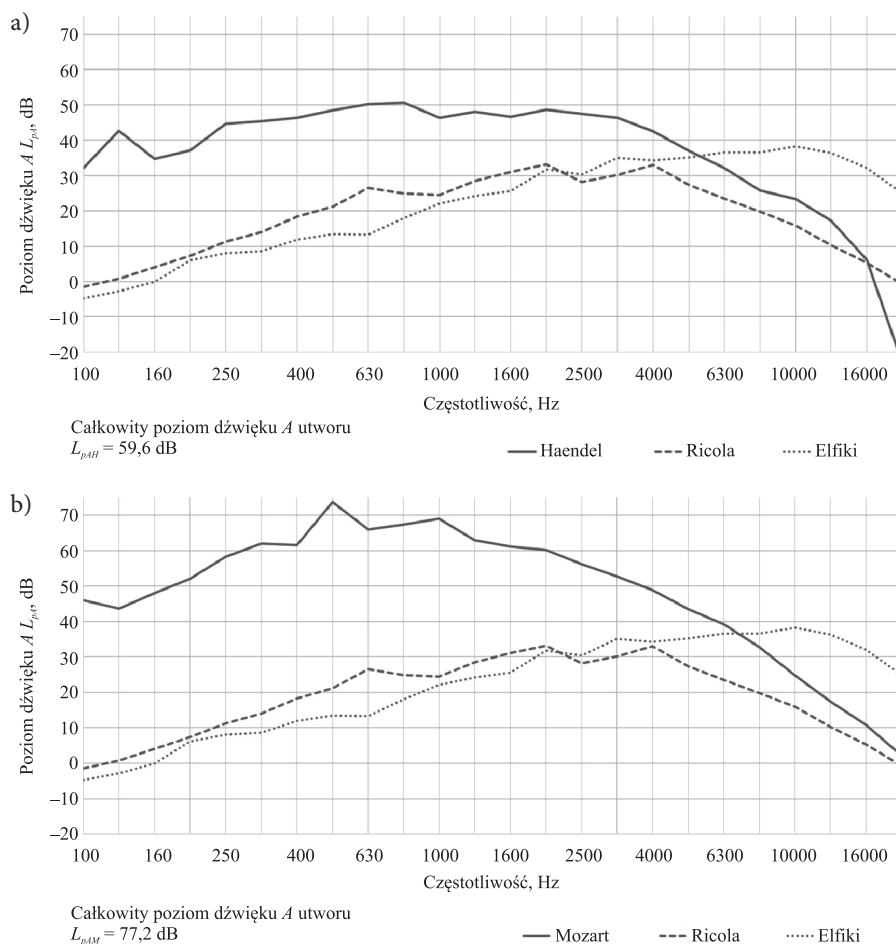
Na potrzeby ankiety przyjęto ogólne założenie, że mniej uciążliwy jest hałas rozpakowywania cukierka, dla którego wartości poszczególnych parametrów akustycznych są niższe. Po uwzględnieniu dodatkowych czynników mogących decydować o uciążliwości, takich jak czas trwania sygnału oraz rozkład częstotliwości w jego widmie, opakowania cukierków zestawiono parami, według kryteriów przedstawionych w tabeli 3.

Tabela 3
Kryteria doboru nagrań do ankiety

Lp.	Kryterium	Opakowanie o niższych parametrach akustycznych	Opakowanie o wyższych parametrach akustycznych
(1)	Skrajnie różne wartości L_{pA} (w nawiasach wartości dla wykorzystanej próbki)	Halls (34,9 dB)	Verbena (44,8 dB)
(2)	Charakter hałasu	Cholinx (hałas impulsowy)	Witamina C (hałas jednostajny)
(3)	Czas ekspozycji	Elfiki (rozpakowywane krótko – 4,5 s)	Elfiki (rozpakowywane długo – 14 s)
(4)	Rozkład częstotliwości w widmie	Elfiki (przewaga częstotliwości 5–10 kHz)	Ricola (przewaga częstotliwości 1–2,5 kHz)

Do badania wykorzystano trzy fragmenty utworów różniących się składem instrumentalnym oraz dynamiką, co implikuje różnice w poziomach oraz rozkładzie częstotliwości [7]. Zestawienie widm amplitudowo-częstotliwościowych fragmentów oratorium *Mesjasz* Haendla [8] oraz *Koncertu klarnetowego A-dur* Mozarta [9] z widmami amplitudowo-częstotliwościowymi dźwięków generowanych przez odwijanie cukierków z kryterium (4) przedstawiono na rysunku 4. Dodatkowo podano całkowite wartości L_{pA} dla obu fragmentów muzycznych (odpowiednio L_{pAH} i L_{pAM}), wyznaczone na podstawie szacowanej mocy akustycznej zespołów instrumentalnych wykonujących każdy z utworów [7] oraz parametrów sali koncertowej Filharmonii im. Karola Szymanowskiego w Krakowie [5].

Dźwięk generowany podczas wyjmowania cukierka Ricola jest niemal we wszystkich pasmach częściowo maskowany przez utwór muzyczny, co czyni go prawie niesłyszalnym. Obecność w widmie dla opakowania cukierka Elfiki wysokich częstotliwości, które w widmie utworu występują w mniejszej ilości, sprawia, że jest on bardziej słyszalny. Drugim istotnym czynnikiem jest dynamika utworu – fragment koncertu Mozarta grany jest w dynamice *forte* (u Haendla oznaczenie dynamiczne to *mezzopiano*, które w wykorzystanych nagraniach zostało minimalnie wzmocnione), a co więcej – cały koncert został napisany na większy skład instrumentalny niż skład występujący w wybranym fragmencie *Mesjasza*. Przez to widoczne są różnice w poziomie ciśnienia akustycznego oraz kształcie widma.

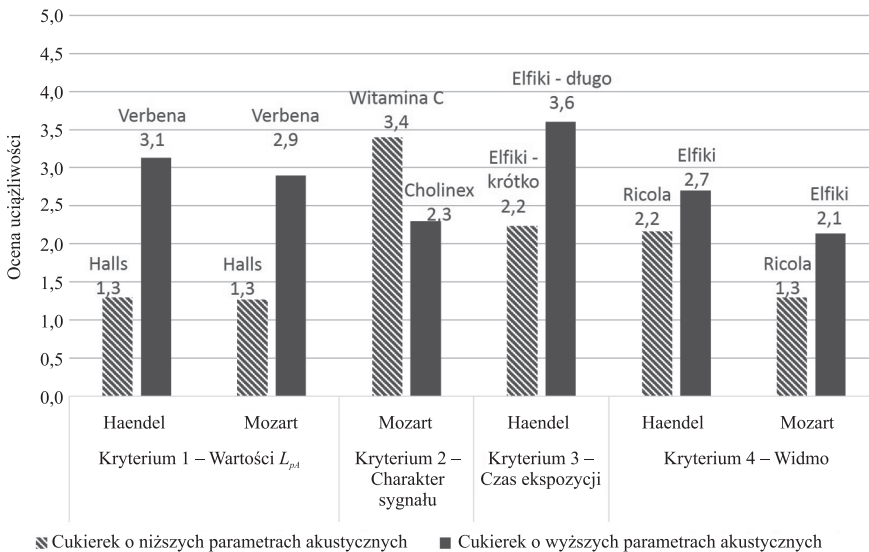


Rys. 4. Zestawienie widm dla opakowań wybranych według kryterium (4) i fragmentów utworów Haendla (a) i Mozarta (b) słyszanych w ostatnich rzędach sali koncertowej Filharmonii im. Karola Szymanowskiego w Krakowie

Bazujące na obliczeniach i obserwacjach przewidywania dotyczące uciążliwości hałasu rozpakowywania poszczególnych cukierków w znacznym stopniu znajdują odzwierciedlenie w wynikach przeprowadzonej ankiety. Rysunek 5 przedstawia średnią ważoną odpowiedzi 30 osób, które uczestniczą w koncertach muzyki klasycznej częściej niż raz w roku. Stanowi ona ocenę uciążliwości hałasu rozpakowywania wybranych cukierków podczas słuchania wspomnianych wyżej utworów muzycznych w skali 0–5, gdzie 0 oznacza niezakłócony odbiór muzyki, a 5 największą uciążliwość. Jest to skala, jaką mieli do dyspozycji słuchacze uczestniczący w ankiecie.

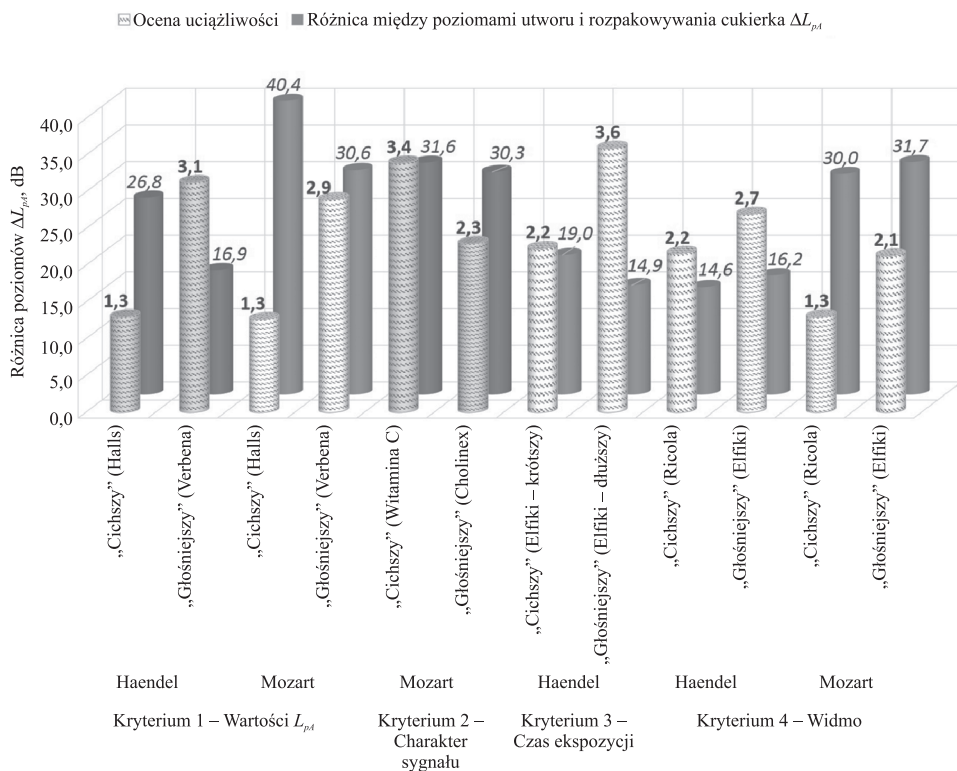
Zgodnie z przewidywaniami, w kryterium (1) za bardziej uciążliwe uznano opakowania, których rozpakowywanie generuje ciśnienie akustyczne o wyższym poziomie.

W kryterium (2) za bardziej uciążliwe uznano rozpakowanie cukierka Witamina C (hałas ciągły) niż tabletki Cholinex (hałas impulsowy), mimo niższych wartości parametrów akustycznych dla tego pierwszego, co sugeruje, że długotrwały hałas jest bardziej uciążliwy od impulsu o porównywalnym poziomie ciśnienia akustycznego. Chociaż moc akustyczna jest odwrotnie proporcjonalna do szybkości rozpakowywania cukierka (szybsze rozpakowywanie związane jest z wyższym L_{WA}), w kryterium (3) również za bardziej uciążliwy uznany został sygnał trwający dłużej. Ocena według kryterium (4) potwierdza rolę rozkładu częstotliwości w sygnale – za bardziej uciążliwy uznano dźwięk rozpakowywania zawierający więcej wysokich częstotliwości przy podobnych poziomach ciśnienia akustycznego (rozbieżność rzędu 2 dB).



Rys. 5. Wyniki ankiety – porównanie oceny uciążliwości opakowań cukierków dla każdego z kryteriów

Rysunek 6 ukazuje zależność oceny uciążliwości od różnicy poziomów między utworem muzycznym a hałasem opakowania (ΔL_{pA}). W najprostszym ujęciu im mniejsza różnica, tym bardziej słyszalne jest rozpakowywanie cukierka (kryterium (1)), co wiąże się z większą uciążliwością. Równie istotnym czynnikiem jest charakterystyka częstotliwościowa sygnału (kryterium (4)), gdzie ocena uciążliwości zmienia się niezależnie od ΔL_{pA} . W kryterium (2) mimo porównywalnych różnic w poziomie dźwięku A za bardziej uciążliwe uznano trwające dłużej rozpakowywanie cukierka Witamina C. Analogicznie, dla kryterium (3), również związanego z czasem rozpakowywania, różnice w ocenie uciążliwości są nieproporcjonalne do różnic poziomów ΔL_{pA} .



Rys. 6. Porównanie oceny uciążliwości dźwięku rozpakowywania cukierków dla każdego kryterium w zestawieniu z różnicą między L_{pA} dla utworu i opakowania

4. PODSUMOWANIE

Parametry akustyczne dla dźwięku generowanego podczas rozpakowywania poszczególnych cukierków, poza skrajnymi przypadkami cukierków Halls i nieuwzględnionych ostatecznie w analizie wawelskich Michałków i Mieszanki Krakowskiej, przyjmują porównywalne wartości. Wstępna analiza psychoakustyczna, własne obserwacje oraz wyniki przeprowadzonej ankiety wskazują jednak, że mimo to percepcja tych zjawisk jest zróżnicowana. Uciążliwość hałasu rozpakowywanego cukierka zależy od rozkładu częstotliwości w widmie, szczególnie od amplitud w pasmach, dla których czułość ludzkiego ucha jest największa, oraz od przebiegu sygnału w czasie. W dokładniejszym określeniu tych zależności może być pomocne wyznaczenie dodatkowych parametrów psychoakustycznych oraz przeprowadzenie na szerszą skalę badań wśród słuchaczy.

W analizie rozpatrywanej sytuacji rozpakowywania cukierka podczas koncertu należy wziąć pod uwagę „tło akustyczne”, jakim jest wykonywana muzyka. Dopiero po uwzględnieniu wzajemnego oddziaływania obu tych zjawisk akustycznych możliwa jest

ocena uciążliwości omawianego zdarzenia, przy czym zależy ona nie tylko od możliwych do obliczenia parametrów akustycznych i psychoakustycznych, ale także od indywidualnej percepcji każdego słuchacza i czynników psychologicznych. W ujęciu akustycznym stwierdzono, że na ocenę uciążliwości wpływa moc akustyczna, rozkład częstotliwości w widmach tak dźwięku rozpakowywania cukierka, jak utworu muzycznego, charakter hałasu, czas jego emisji oraz dynamika utworu muzycznego i wykonujący go skład instrumentalny.

LITERATURA

- [1] Schnabel T.: Coughing During Concerts and Recordings, <http://blogs.kcrw.com/rhythm-planet/coughing-and-other-unwanted-noise-in-concerts-and-recordings> [data dostępu: 10.02.2016]
- [2] PN-B-02151-02:1987 – Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach – Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach
- [3] Jeong C., Marie P., Brunskog J., Møller Petersen C.: Audience noise in concert halls during musical performances, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131, 4, 2753–2761
- [4] PN-EN ISO 3741 – Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metody dokładne w komorach pogłosowych
- [5] Sprawozdanie z pomiarów w Filharmonii im. Karola Szymanowskiego w Krakowie z dn. 9.06.2015, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
- [6] Fastl H., Zwicker E.: *Psychoacoustics. Facts and models. Third Edition*, Heidelberg 2007
- [7] Meyer J.: *Acoustics and the Performance of Music. Fifth Edition*, New York 2009
- [8] Haendel G.F.: *Mesjasz, Pifa, HWV 56. Wykonanie: Ama Deus Ensemble, dyr. Radu V.*, 1994
- [9] Mozart W.A.: *Koncert na klarnet A-dur, I. Allegro, KV 622. Wykonanie: McColl W., University of Washington Symphony, dyr. Kaplan A.*, 1987

**BADANIA I OCENA
PARAMETRÓW ELEKTROAKUSTYCZNYCH
ZESTAWÓW GŁOŚNIKOWYCH**

Research and evaluation of
loudspeaker electroacoustic parameters

Piotr OTREBA

Politechnika Wroclawska,
Wydział Elektroniki,
piotr.a.otreba@pwr.edu.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań obudów głośnikowych ze ściankami drewnianymi bez pokrycia oraz z pokryciem masą bitumiczną i różnym stopniu wypełnienia wełną owczą. Stosowano cztery warianty: bez wypełnienia, z wypełnieniem luźnym (1/3), średnim (2/3) i gęstym (3/3). W sumie badano osiem różnych wariantów pokrycia masą bitumiczną i wypełnienia wełną owczą. Badano charakterystykę częstotliwościową ciśnienia akustycznego, charakterystykę fazową (część minimalnofazowa), charakterystykę impedancji elektrycznej oraz zniekształcenia nieliniowe dla różnych wartości dostarczanej mocy. Stwierdzono duży wpływ wypełnienia obudowy na jej właściwości elektryczne i akustyczne, natomiast pokrycie obudowy matą bitumiczną nie wpłynęło w żaden sposób na jej właściwości akustyczne.

ABSTRACT

The paper presents the results of measurements of speaker enclosures with the walls of wood, without cover and coated with bitumen and the different conditions the fulfillment of sheep's wool. Four variants fulfillment have been used: without fulfillment, with fulfillment loose (1/3), medium (2/3) and thick (3/3). A total of 8 different variants covering bitumen and fill sheep's wool have been studied. It was studied the frequency response of sound pressure, phase characteristics (minimal phase part), characteristics of electrical impedance, and harmonic distortion for the different values of the delivered power. It was found a big impact on process ability sheep's wool, while bitumen mat did not affect in any way the processing properties.

1. WSTĘP

W konstrukcji obudowy głośnikowej dąży się do uzyskania możliwie wyrównanej charakterystyki ciśnienia akustycznego w całym paśmie przenoszenia, ze zminimalizowanym wpływem rezonansów, charakterystyki fazowej i możliwie małych zniekształceniach nieliniowych. Na właściwości zestawów głośnikowych wpływają zarówno parametry głośnika, jak i parametry obudowy. Obudowa głośnikowa wprowadza swoje rezonanse, które mogą być rezonansami wnętrza obudowy oraz rezonansami nieliniowymi ścianek obudowy. Aby zmniejszyć wpływ tych rezonansów, wewnątrz obudowy wypełnia się między innymi wełną mineralną, watą szklaną. Natomiast ścianki obudowy pokrywa się materiałami wytłumiającymi drgania mechaniczne. Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu wypełnienia obudowy wełną owczą na właściwości zestawów głośnikowych. Badano wpływ różnego stopnia wypełnienia watą owczą oraz pokrycia ścianek masą bitumiczną.

Problemy wypełnienia obudów głośnikowych można znaleźć w książkach pt. *The Loudspeaker Design Cookbook* [1] oraz *Podręcznik budowy zestawów głośnikowych* [2].

2. METODA POMIAROWA

Charakterystyki akustyczne, drganiowe oraz elektryczne mierzono w komorze bezpogłosowej z użyciem zestawu pomiarowego DA2 firmy Klippel – narzędzia przeznaczonego

do pomiarów głośników. Zestawy badano z wykorzystaniem modułów pomiarowych LPM (*Linear Parameter Model*) oraz TRF (*TRansfer Functions*) [3]. W skład zestawu pomiarowego wchodził ponadto komputer z zainstalowanym oprogramowaniem firmy Klippel oraz wzmacniacz mocy firmy MMF.

Za pomocą modułu LPM mierzono charakterystyki:

- ciśnienia akustycznego,
- modułu impedancji,
- fazy impedancji elektrycznej.

Wszystkie charakterystyki mierzono dla dwóch wariantów pobudzenia:

- napięciem 0,2 V (0,01 W),
- napięciem 2 V (1 W).

Za pomocą modułu TRF mierzono charakterystyki:

- krzywą czasową energii ETC (*energy time curve*),
- ciśnienia akustycznego,
- odpowiedzi minimalnofazowej.

Wszystkie charakterystyki mierzono dla trzech wariantów pobudzenia sygnałem „chirp”:

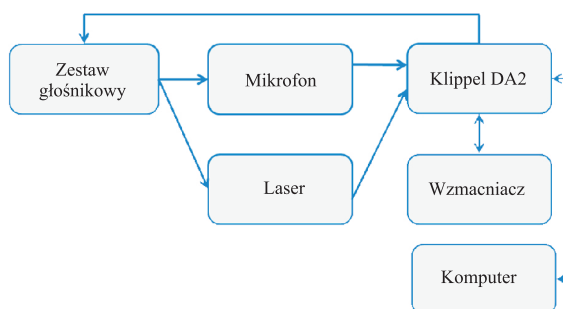
- napięciem 1 V (0,25 W),
- napięciem 2 V (1 W),
- napięciem 5 V (6,25 W).

W ostatnim przypadku pomiary ograniczono do zakresu częstotliwości poniżej 2 kHz, aby uniknąć uszkodzenia głośnika wysokotonowego.

Rysunek 1 przedstawia badany zestaw głośnikowy. Składał się on z dwóch identycznych głośników niskotonowych oraz jednego głośnika wysokotonowego. Na rysunku 2 przedstawiono blokowy schemat badanego układu oraz połączeń pomiędzy zestawem głośnikowym, urządzeniem mierzącym, wzmacniaczem oraz laserem i mikrofonem.



Rys. 1. Badany zestaw głośnikowy



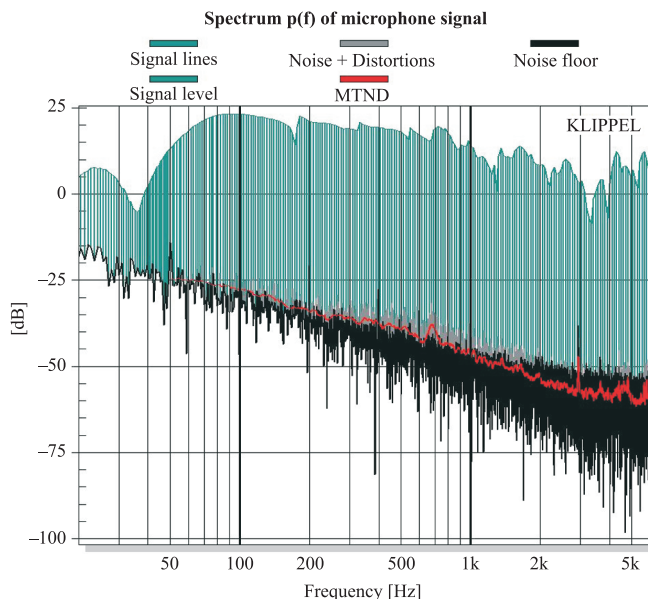
Rys. 2. Blokowy schemat pomiarowy

3. POMIARY MODUŁEM LPM

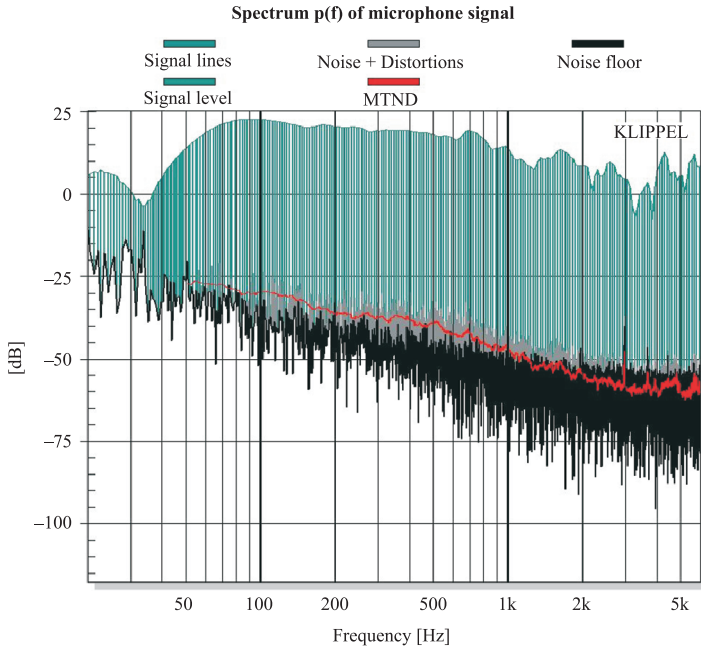
Pomiary zostały wykonane w komorze bezpogłosowej Katedry Akustyki i Multimediów Politechniki Wrocławskiej za pomocą zestawu pomiarowego DA2 firmy Klippel. Do pomiarów użyto modułu LPM (*Linear Parameter Model*) stanowiącego narzędzie software'owe współpracujące z zestawem DA2.

Moduł LPM określa parametry elektryczne i mechaniczne (parametry Thiele'a–Smalla) przetworników, skupia się na precyzyjnych pomiarach małych parametrów sygnałów.

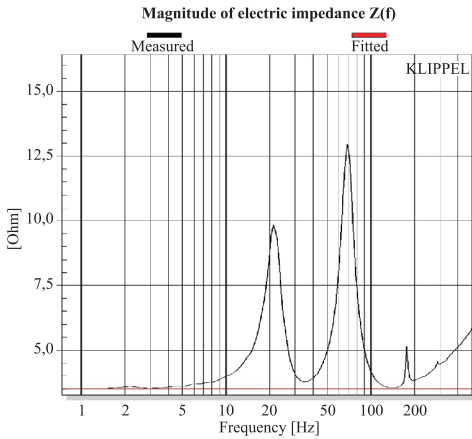
Rysunki od 3 do 8 przedstawiają pomiary charakterystyk częstotliwościowych ciśnienia akustycznego, modułu impedancji oraz fazy impedancji w dwóch wariantach: bez wypełnienia oraz z wypełnieniem. Znaczące różnice w charakterystykach można zaobserwować po wypełnieniu luźnym (1/3). Dalsze wypełnianie do (2/3) czy (3/3) nie przyniosło zauważalnej poprawy charakterystyk. Dostrzegalny spadek poziomu w charakterystyce częstotliwościowej ciśnienia akustycznego występuje na częstotliwości ok. 180 Hz (rys. 3). Rezonans ten występuje zarówno na charakterystyce modułu impedancji, jak i fazy impedancji, co ilustrują rysunki 5 i 7. Wypełnienie luźne (1/3) niweluje tę nierównomierność, co można zaobserwować na rysunkach 4, 6 oraz 8. Kolejne takie zjawiska, ale o mniejszej skali, występują dla częstotliwości ok. 320 Hz, 540 Hz, 900 Hz.



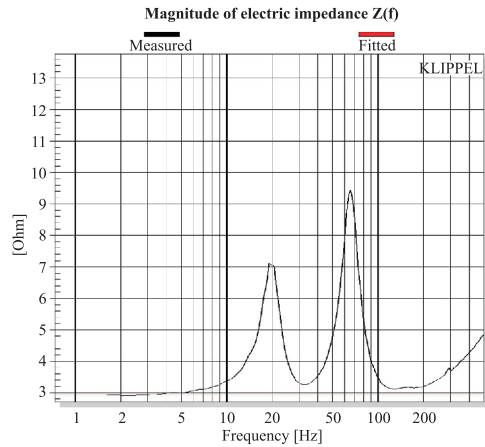
Rys. 3. Charakterystyka częstotliwościowa ciśnienia akustycznego bez wytlumienia. Kolorem czerwonym oznaczono poziom zniekształceń nieliniowych przy pobudzeniu wielotonem, szarym poziom zniekształceń wraz z szumem, zielonym poziom sygnału, czarnym poziom szumów



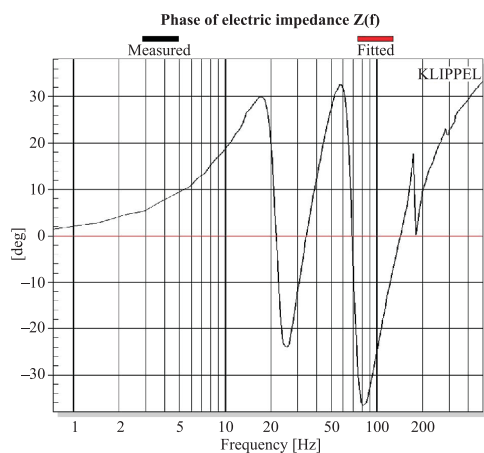
Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa ciśnienia akustycznego z wytlumieniem luźnym (1/3). Kolorem czerwonym oznaczono poziom zniekształceń nieliniowych przy pobudzeniu wielotonem, szarym poziom zniekształceń wraz z szumem, zielonym poziom sygnału, czarnym poziom szumów



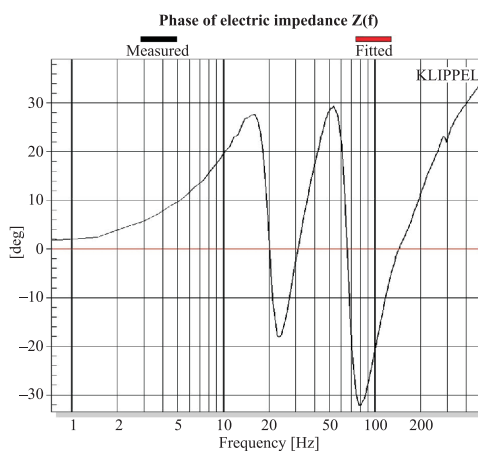
Rys. 5. Charakterystyka częstotliwościowa modułu impedancji bez wytlumienia



Rys. 6. Charakterystyka częstotliwościowa modułu impedancji z wytlumieniem średnim (2/3)



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa fazy impedancji bez wy tłumienia



Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa fazy impedancji z wy tłumieniem średnim (2/3)

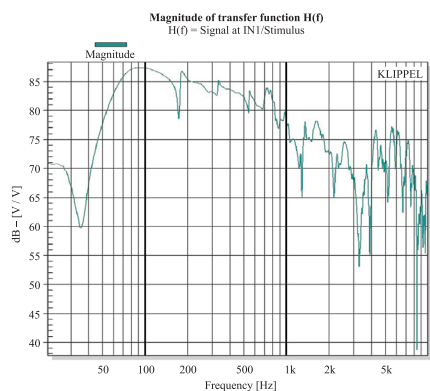
4. POMIARY MODUŁEM TRF

Pomiary, tak jak w przypadku modułu LPM, zostały wykonane w komorze bezpogłosowej Katedry Akustyki i Multimediów Politechniki Wrocławskiej za pomocą zestawu pomiarowego DA2 firmy Klippel z użyciem modułu TRF (*T*ransfer *F*unctions).

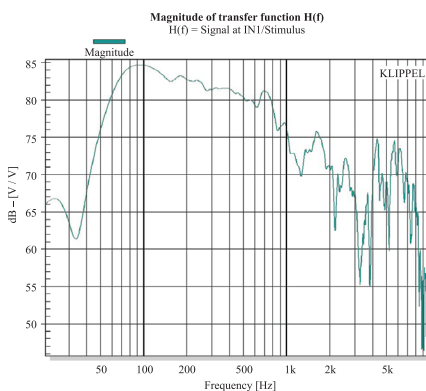
Moduł TRF jest używany do wykonywania typowych pomiarów akustycznych, między innymi impedancji, częstotliwości ciśnienia akustycznego oraz wychyleń membrany.

Rysunki 9–14 przedstawiają pomiary charakterystyk częstotliwościowych ciśnienia akustycznego, fazowych (część minimalnofazowa) oraz krzywych czasowych energii ETC. Różnice występujące w charakterystykach można zaobserwować już po wypełnieniu luznym (1/3), tak jak to miało miejsce w poprzednich pomiarach. Dalsze wypełnianie obudów głośnikowych nie przyniosło poprawy charakterystyk. Na rysunku 9 przedstawiony jest zauważalny spadek poziomu w charakterystyce częstotliwości ciśnienia akustycznego, który występuje na częstotliwości ok. 180 Hz.

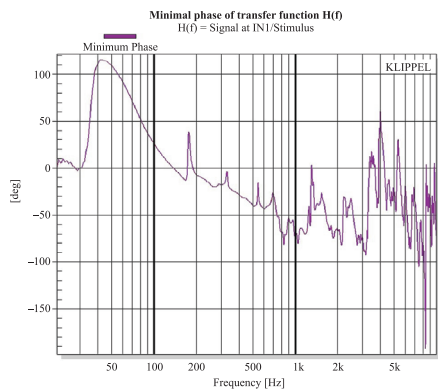
Pozostałe rezonanse występują na tych samych częstotliwościach, jakie występowały w pomiarach modułem LPM. Dodatkowy pomiar charakterystyki minimalnofazowej (rys. 11) również potwierdza skoki w poziomie charakterystyk. Na krzywej ETC (rys. 13, 14) obudowy niewy tłumionej występuje szereg wyraźnie widocznych odbić powodujących na przemian interferencję destruktywną (zmniejszenie poziomu), jak i konstruktywną (zwiększenie poziomu). Odbicia te znikają wraz z wy tłumieniem luznym (1/3) obudowy.



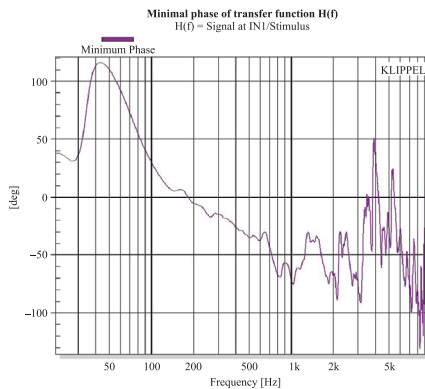
Rys. 9. Charakterystyka częstotliwościowa ciśnienia akustycznego bez wytłumienia



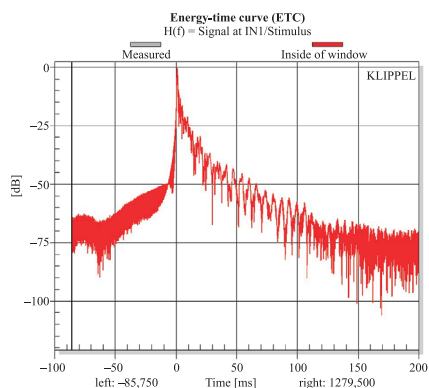
Rys. 10. Charakterystyka częstotliwościowa ciśnienia akustycznego z wytłumieniem luźnym (1/3)



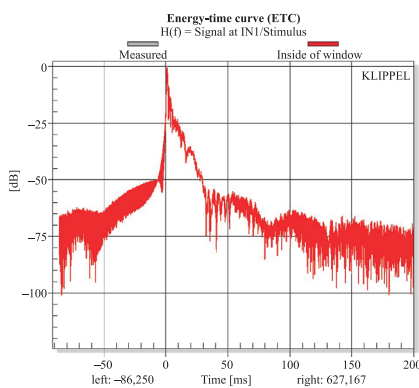
Rys. 11. Charakterystyka fazowa (część minimalnofazowa) bez wytłumienia



Rys. 12. Charakterystyka fazowa (część minimalnofazowa) z wytłumieniem (1/3)



Rys. 13. Krzywa czasowa energii ETC bez wytłumienia



Rys. 14. Krzywa czasowa energii ETC z wytłumieniem luźnym (1/3)

5. ANALIZA WYNIKÓW I PODSUMOWANIE

Obudowa bez wytlumienia wykazuje znaczną nierównomierność charakterystyki częstotliwościowej w zakresie małych i średnich częstotliwości. Dotyczy to zarówno charakterystyk ciśnienia akustycznego, minimalnej fazy, jak i impedancji: modułu oraz fazy. Pierwsze obniżenie poziomu na charakterystyce ciśnienia akustycznego występuje na częstotliwości ok. 180 Hz. Na tej częstotliwości występuje dodatkowe (oprócz rezonansów głównych) podbicie na charakterystyce impedancji mechanicznej oraz duże wahania charakterystyk fazowych: impedancji elektrycznej oraz ciśnienia akustycznego. Jest to widoczne również na krzywej czasowej energii. Na krzywej ETC obudowy niewytłumionej występuje szereg wyraźnie widocznych odbić powodujących na przemian interferencję destruktywną (zmniejszenie poziomu), jak i konstruktywną (zwiększanie poziomu). Odbicia te znikają wraz z wytłumieniem obudowy. Kolejne takie zjawiska, ale o mniejszej skali, występują dla częstotliwości ok. 320 Hz, 540 Hz, 900 Hz. Wypełnienie obudowy, nawet luźne, powoduje usunięcie tych rezonansów. Świadczy to o tym, że rezonanse te są rezonansami akustycznymi wnętrza obudowy. Zwiększanie gęstości wytłumienia wełną owczą powoduje dalsze, ale niewielkie wygładzenie charakterystyk. Wydaje się, że wytłumienie luźne jest wystarczające.

Wytłumienie obudowy powoduje przesunięcie częstotliwości rezonansowych nieco w dół. Największa zmiana występuje pomiędzy obudową bez wytłumienia a obudową z wytłumieniem luźnym. Przy dalszym przejściu do wytłumienia średniego zmiana jest niezauważalna. Zauważalna, acz niewielka, jest dla wypełnienia gęstego. Zmiana częstotliwości rezonansowych wiąże się z zamianą procesów termodynamicznych wewnątrz obudowy: następuje zmniejszenie wykładnika adiabaty, co powoduje efektywny wzrost objętości obudowy [4].

Nie zauważono istotnego wpływu wytłumienia drgań ścianek przez ich pokrycie masą bitumiczną na parametry akustyczne zestawu głośnikowego. Niewielkie różnice mogą być spowodowane błędami pomiarowymi lub nieznacznymi rozbieżnościami parametrów zastosowanych elementów elektronicznych.

LITERATURA

- [1] Dickason V.: The Loudspeaker Design Cookbook, 5th edition, Peterborough 1995
- [2] Hausdorf F.: Podręcznik budowy zestawów głośnikowych, Poznań 1996
- [3] Reference Manual DA2, Klippel GmbH
- [4] Dobrucki A.: Przetworniki elektroakustyczne, Warszawa 2007