https://doi.org/10.7494/978-83-67427-06-7_11

Metodyka wyznaczania charakterystyk kierunkowości głośników modów rozproszonych

Karol Czesak*, Piotr Kleczkowski, Aleksandra Król-Nowak

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

* czesak@agh.edu.pl

Streszczenie

Głośniki modów rozproszonych charakteryzują się o wiele szerszym kątem promieniowania niż przetworniki tłokowe. Ich działanie przypomina niekoherentne źródła dźwięku i wytwarzają one pole akustyczne o bardziej rozproszonej charakterystyce.

Aby ocenić charakterystykę częstotliwościową takich głośników, nie wystarcza pomiar ciśnienia akustycznego ani w osi głośnika, ani w kilku kierunkach, ponieważ wartości mierzone w sąsiadujących ze sobą punktach pomiarowych mogą znacząco różnić się między sobą. Co więcej – w przeciwieństwie do konwencjonalnych przetworników tłokowych – głośniki modów rozproszonych nie wytwarzają maksymalnych wartości ciśnienia akustycznego na osi przetwornika. Ocena taka może więc być przeprowadzona tylko na podstawie pomiaru widma mocy. W niniejszej pracy przedstawiono planowanie oraz przygotowanie procedury pomiarowej, której celem jest uzyskanie precyzyjnego pomiaru takiego widma. Jednocześnie obejmuje ona również precyzyjny pomiar charakterystyk kierunkowych na półsferze. Istotną częścią procedury jest wyznaczenie odpowiednich wag punktów pomiarowych znajdujących się na równoleżnikowych okręgach na sferze pomiarowej, związanych z poszczególnymi kątami elewacji pomiaru przestrzennego.

1. Wstęp

Cechą charakterystyczną głośników modów rozproszonych (DML, *Distributed Mode Loudspeakers)*, która w największym stopniu odróżnia je od konwencjonalnych przetworników tłokowych, jest brak zjawiska zawężania szerokości promieniowanej wiązki wraz ze wzrostem częstotliwości pobudzenia [1]. Także poziom ciśnienia akustycznego, mierzony na osi prostopadłej do powierzchni płaskiego panelu głośnikowego, nie osiąga najwyższych wartości spośród poziomów mierzonych w innych punktach pomiarowych rozmieszczonych na półsferze. Wart odnotowania jest też fakt, że charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe uzyskiwane w dwóch sąsiednich punktach pomiarowych (dla tego samego kąta elewacji, jednak przy zmiennym kącie azymutalnym, ewentualnie przy tym samym azymucie i zmienianym kącie elewacji) bardzo często znacząco różnią się od siebie, co zdecydowanie utrudnia wykreślenie charakterystyk kierunkowości dotyczących głośnika modów rozproszonych, przy zastosowaniu podejścia takiego jak w przypadku konwencjonalnego przetwornika [2]. Zazwyczaj głośniki te mają kształt prostokątny z różnymi wymiarami obu boków, co może skutkować różniącymi się charakterystykami

kierunkowymi w płaszczyznach poziomej i pionowej. Z wyżej wymienionych trzech cech wynika, że pomiar charakterystyki częstotliwościowej głośnika modów rozproszonych nie może być przeprowadzony wyłącznie w osi głośnika, nie jest też w pełni przydatny pomiar w płaszczyźnie poziomej. Niezbędną informację o własnościach głośnika może przynieść tylko pomiar pełnej charakterystyki kierunkowej na sferze, ewentualnie na półsferze. Właściwym odpowiednikiem charakterystyki częstotliwościowej jest w przypadku tych głośników średnia z charakterystyk na sferze, ewentualnie półsferze, czyli częstotliwościowa charakterystyka mocy.

Ze względu na niekoherentny charakter promieniowania głośnika DML częstotliwościowe charakterystyki fazowe znacząco różnią się we wszystkich kierunkach i analizowanie części fazowej charakterystyki jest bezcelowe, jeżeli przedmiotem analizy nie jest charakterystyka wyłącznie w jednym, wybranym kierunku. W związku z tym charakterystyka częstotliwościowa tego głośnika jest wyłącznie charakterystyką amplitudową. Ponieważ musi ona powstać w wyniku uśredniania charakterystyk zmierzonych w założonej siatce kierunków na sferze, do uzyskania tej średniej wystarczające są charakterystyki amplitudowe w poszczególnych kierunkach.

Wspomniane właściwości głośników DML wpływają na ich zachowanie w rzeczywistym pomieszczeniu odsłuchowym, gdzie występują odbicia dźwięku od ścian, podłogi, sufitu i elementów wyposażenia pomieszczenia. Przetworniki tego typu charakteryzuje niższa sprawność niż konwencjonalnych głośników tłokowych, jednak dzięki bardziej rozproszonej charakterystyce promieniowanego przez nie dźwięku, ich działanie prowadzi do innych rozkładów postrzeganej głośności w pomieszczeniu niż przy zastosowaniu konwencjonalnych przetworników elektroakustycznych [3]. Powyższe rozważania prowadzą do konkluzji, że zjawiska odbicia dźwięku w pomieszczeniu stają się mniej destrukcyjne dla słuchacza w przypadku działania w nim głośników modów rozproszonych. Emisja bardziej rozproszonej wiązki teoretycznie pozwala więc na reprodukcję dźwięku w jakości lepszej niż za pomocą głośników tłokowych. Ze względu na większą powierzchnię promieniującą w głośniku DML uzyskanie zadowalającego poziomu ciśnienia akustycznego w miejscu odsłuchu w przypadku zastosowania głośnika DML wymaga znacząco mniejszej amplitudy pobudzenia niż przy korzystaniu z konwencjonalnych przetworników.

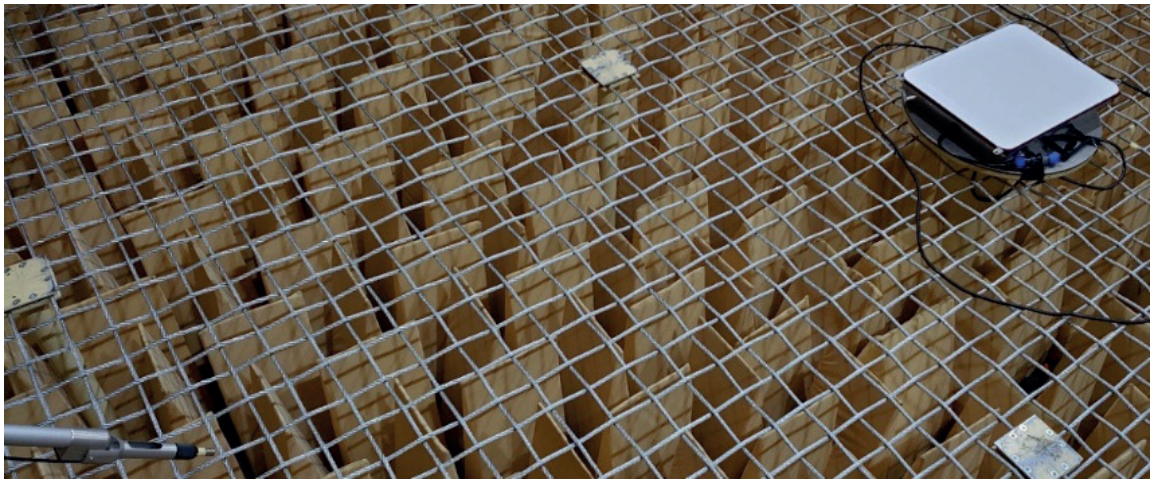
2. Geometria pomiaru

Spośród dwóch możliwych wariantów – pomiar na sferze oraz na półsferze – wybrano jedynie pomiar na półsferze. Wynikało to z cechy przykładowych głośników, których pomiar zaplanowano. Były to głośniki Amina Edge 5i, dostarczane przez producenta w obudowie zamkniętej. Warto zauważyć, że dodatkową zaletą głośników DML jest ich mała głębokość, co ułatwia ich montaż w płaszczyźnie ściany. Taki montaż jest zalecany przez producenta i z kilku powodów można go uznać za optymalny sposób montażu w przypadku głośnika każdego typu [4].

Najwłaściwszy pomiar głośnika przeznaczonego do montażu w płaszczyźnie ściany powinien więc być pomiarem w siatce punktów rozmieszczonych na półsferze, z jednoczesnym montażem głośnika w płaszczyźnie dużej powierzchni, najlepiej o rozmiarach podłogi komory bezechowej. Jednak ze względu na niezbędne zastosowanie stolika obrotowego (rys. 1) powierzchnia taka musiałaby mieć okrągły otwór o średnicy przekraczającej przekątną badanego głośnika DML. Niezgodność takiego rozwiązania z żadnym standardem pomiarowym spowodowała, że zdecydowano się przeprowadzić pomiar bez zastosowania powierzchni ograniczającej półsferę. Pomiar taki powinien więc być uzupełniony pomiarem przeprowadzonym tylko w jednej płaszczyźnie pionowej, eliminującym potrzebę stosowania stolika obrotowego, przy zastosowaniu płaszczyzny ograniczającej, z otworem dopasowanym do kształtu głośnika DML. Taki pomiar uzupełniający pomoże ocenić różnice w charakterystyce spowodowane wprowadzeniem płaszczyzny ograniczającej.

Każdy z badanych głośników modów rozproszonych poddawany był pomiarowi charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej w 325 punktach, rozmieszczonych na półsferze, z rozdzielczością kątową równą 10° (jeden punkt na osi prostopadłej do płaszczyzny przetwornika oraz po 36 punktów rozmieszczonych co 10° na równoleżnikowych okręgach, każdy okrąg dla jednego z dziewięciu kątów

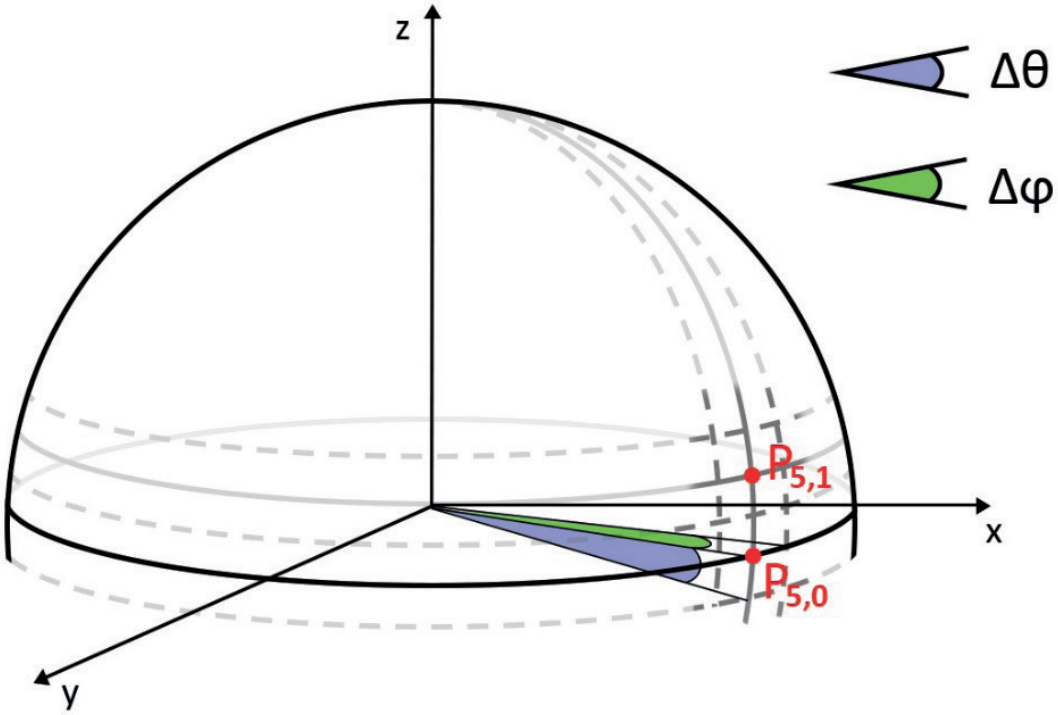
elewacji). Pomiary charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych na półsferze wykonywano w dużej komorze bezechowej Laboratorium Akustyki Technicznej w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie. Kąt elewacji zadawany był w wyniku podnoszenia i opuszczania mikrofonu z użyciem zainstalowanego w komorze zautomatyzowanego ramienia, zaś kąt azymutalny – w efekcie obrotu stolika, do którego przytwierdzony był DML. Oba wymienione urządzenia sprzężone były z komputerem klasy PC zaprogramowanym w środowisku LabVIEW, co umożliwiało sprawne i dokładne (do dziesiątych części stopnia) zadawanie kolejnych punktów pomiarowych. System umożliwiał też precyzyjną kontrolę promienia półsfery, który w omawianym przypadku wynosił 2,5 metra. Była to maksymalna odległość mikrofonu pomiarowego od środka stolika obrotowego, technicznie możliwa w dostępnym systemie pomiarowym. Decyzja o zastosowaniu możliwie największej odległości mikrofonu od DML podyktowana była założeniem o ograniczeniu warunków pola bliskiego. Przykładową konfigurację do pomiaru w jednym z punktów o niewielkim kącie elewacji przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Rozmieszczenie badanego przetwornika oraz mikrofonu pomiarowego (w dolnym lewym rogu) w komorze bezechowej

Z zachowania stałej rozdzielczości kątowej prowadzonych pomiarów wynika jednak potrzeba korekty przy obliczaniu częstotliwościowej charakterystyki mocy promieniowanej przez głośnik. Wraz z kątem elewacji zmienia się zagęszczenie punktów pomiarowych na sferze, a tym samym zmieniają się pola wycinków powierzchni półsfery pomiarowej, reprezentowane przez poszczególne punkty [5]. Zatem dla każdego punktu pomiarowego należy wyznaczyć współczynnik proporcjonalny do odpowiadającego mu fragmentu pola powierzchni sfery. Przyjmijmy sferyczny układ współrzędnych, w którym $r \geq 0$ to promień wodzący, $\varphi = [0, 2\pi)$ oraz $\theta \in [-\pi/16, \pi/2]$, tzw. kąt elewacji, którego zakres wynika z określonych dalej pozycji punktów pomiarowych i odpowiadających im wycinków pola powierzchni sfery. Głośnik umiejscowiony jest w płaszczyźnie $\theta = 0$, w środku układu współrzędnych, i zwrócony w kierunku $\theta = \pi/2$. Punkty pomiarowe znajdują się na półsferze o promieniu $r = 2{,}5$ m, w punktach $P_{k,l}$ o współrzędnych $\{(\varphi, \theta): \varphi = (\pi/18)k, \theta = (\pi/18)l$, gdzie $k = 0, 1, \ldots, 35$ i $l = 0, 1, \ldots, 8\}$ oraz w punkcie P_9 o współrzędnej $\theta = \pi/2$. Obszary reprezentowane przez kolejne punkty pomiarowe $P_{k,l}$ można określić jako wycinki pola powierzchni sfery spełniające warunki $\varphi \in [(\pi/18)k - \pi/36, (\pi/18)k + \pi/36)$ oraz $\theta \in [(\pi/18)l - \pi/36, (\pi/18)l + \pi/36)$, dla $k = 0, 1, \ldots, 35$ i $l = 0, 1, \ldots, 8$, natomiast punkt P_9 reprezentuje obszar spełniający warunek $\theta \in [\ 17\pi/36, \pi/2]$. Przyjęty sposób podziału powierzchni sfery przedstawiono na rysunku 2.

Użycie tego typu podziałów można znaleźć w publikacjach opisujących pomiary dotyczące kierunkowości głośników [5, 6], przy czym rozważana jest zwykle tylko półsfera przed głośnikiem. Tymczasem w niniejszej pracy, zgodnie z wprowadzonymi wzorami, dla punktów o odległości zenitalnej $\theta = 0$, obszary przez nie reprezentowane wykraczają poza tę półsferę, sięgając odległości zenitalnej $\theta = -\pi/36$. Taki sposób określenia obszarów uzasadnia fakt, że w pomiarach nie zastosowano powierzchni ograniczającej emisję głośnika.



Rys. 2. Podział sfery na obszary reprezentowane przez wybrane punkty pomiarowe, gdzie zgodnie z przyjętym podziałem Δθ = Δφ = 5°

Problem wyznaczenia współczynników można rozwiązać metodą analityczną, obliczając odpowiednie całki powierzchniowe. Zauważmy, że punkty o tej samej odległości azymutalnej θ reprezentują obszary o tym samym polu powierzchni. Zatem, aby obliczyć pole takiego obszaru, wystarczy obliczyć pole powierzchni wycinka sfery w zakresie $\theta \in [(\pi/18)l - \pi/36, (\pi/18)l + \pi/36)$, a następnie podzielić przez liczbę punktów rozmieszczonych w tym fragmencie powierzchni sfery. Współczynniki wyznaczane są na powierzchni sfery jednostkowej, czyli dla $r = 1$. Stąd dla kolejnych $l = 1, \ldots, 8$.

$$w_{k,l} = \frac{1}{36} \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{\theta=\frac{\pi}{18}l-\frac{\pi}{36}}^{\theta=\frac{\pi}{18}l+\frac{\pi}{36}} \cos\theta d\theta d\varphi = \frac{\pi}{18}\left(\sin\left(\frac{\pi}{18}l+\frac{\pi}{36}\right)-\sin\left(\frac{\pi}{18}l-\frac{\pi}{36}\right)\right) \tag{1}$$

Szczególnymi przypadkami są punkty, dla których $l = 0$ i $l = 9$. Wtedy:

$$w_{k,0} = \frac{1}{18} \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\frac{\pi}{36}} \cos\theta d\theta d\varphi = \frac{\pi}{9}\sin\left(\frac{\pi}{36}\right) \tag{2}$$

oraz:

$$w_9 = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{\theta=\frac{17\pi}{36}}^{\theta=\frac{\pi}{2}} \cos\theta d\theta d\varphi = 2\pi\left(1-\sin\left(\frac{17\pi}{36}\right)\right) \tag{3}$$

Analogiczne wzory, zgodne z wprowadzonymi w danej publikacji układem współrzędnych i umiejscowieniem głośnika, można znaleźć w [7, 8, 9]. Następnie należy jeszcze przeskalować współczynniki tak, aby sumowały się do liczby 1, ponieważ stosowane są w celu wyrównania proporcji, a nie wzmocnienia bądź osłabienia sygnału całkowitego. Otrzymane wartości współczynników w przypadku poszczególnych punktów w zależności od kąta elewacji zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wagi wyznaczone dla punktów pomiarowych wzdłuż poszczególnych kątów elewacji na sferze w obszarze $\theta \in [-\pi/36, \pi/2]$

Lp.	Kąt elewacji [°]	Waga
0	0	0,00445
1	10	0,00439
2	20	0,00419
3	30	0,00386
4	40	0,00341
5	50	0,00286
6	60	0,00223
7	70	0,00152
8	80	0,00077
9	90	0,0035

3. Tor pomiarowy i sygnał wymuszający

W celu minimalizacji błędów pomiarowych zdecydowano się zastosować metodę liniowo przestrajanego sygnału sinusoidalnego, a moduły charakterystyk częstotliwościowych obliczyć z podstawowej zależności:

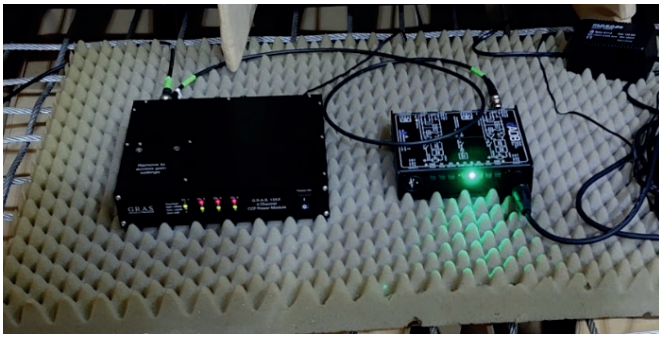
$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \tag{4}$$

gdzie:

$H(j\omega)$ – charakterystyka częstotliwościowa,
$Y(j\omega)$ – transformata Fouriera sygnału na wyjściu układu,
$X(j\omega)$ – transformata Fouriera sygnału wejściowego.

W trosce o dokładność postanowiono również zbadać charakterystykę części odbiorczej toru pomiarowego, co wymagało osobnego pomiaru. Z powodów technicznych zarówno charakterystykę toru odbiorczego, jak i nadawczego (a więc $X(j\omega)$) przeprowadzono w osobnych pomiarach, opisanych w rozdziale 4.

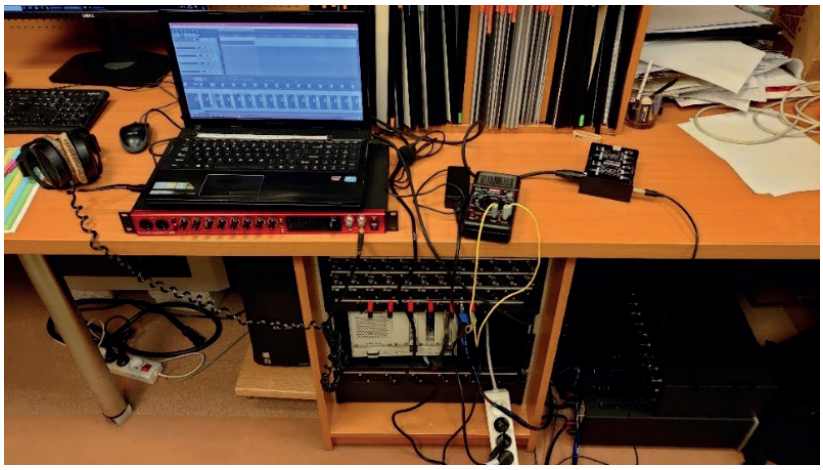
Pomiary charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych głośników modów rozproszonych, w funkcji kierunkowości, prowadzone były za pomocą mikrofonu pola swobodnego G.R.A.S 46AE. Sygnał z mikrofonu (przytwierdzonego do ramienia pomiarowego) trafiał za pośrednictwem przewodu BNC do kondycjonera G.R.A.S 12AK, który również zapewniał zasilanie mikrofonu. Sygnał z kondycjonera podawany był do aktywnego urządzenia typu *direct injection box* (DI) – ART dADB, zapewniającego symetryzację sygnału (pożądaną w przesyle analogowego sygnału audio na odległości większe niż 2 m) oraz jego separację galwaniczną od przetwornika analogowo-cyfrowego. Urządzenia zainstalowane w komorze bezechowej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Elementy toru pomiarowego zainstalowane w komorze bezechowej

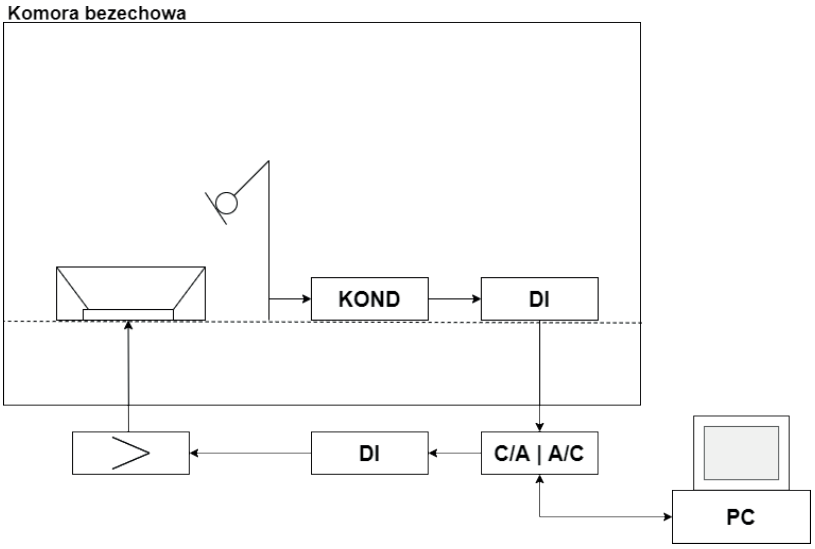
Poza komorą w pomieszczeniu kontrolnym użyty został wielokanałowy zewnętrzny interfejs dźwiękowy Focusrite Clarett 8Pre USB, zawierający m.in. przedwzmacniacze mikrofonowe, przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C) i cyfrowo-analogowe (C/A). Urządzenie to przyjmuje na wejściu sygnały symetryczne oraz ma możliwość zasilania przyłączonych urządzeń wejściowych napięciem +48 V. Do jednego z wejść symetrycznych dla sygnałów o poziomie liniowym włączono wyjście z urządzenia DI, czyli sygnał z mikrofonu.

Wyjścia sygnałowe tegoż urządzenia również są symetryczne. Do jednego z wyjść, za pośrednictwem pasywnego urządzenia typu *direct injection box* RH-Sound DB-02 (użytego w celu desymetryzacji sygnału oraz separacji galwanicznej wzmacniacza mocy od przetwornika C/A), przyłączony został wzmacniacz mocy Anthem PVA-7, zasilający badane przetworniki elektroakustyczne sygnałem wymuszającym. Równolegle z płaskim panelem głośnikowym do wyjścia wzmacniacza przyłączony był woltomierz. Sygnał wracający z komory bezechowej kontrolowany był przy użyciu słuchawek Beyerdynamic DT-990. Urządzenia zainstalowane w pomieszczeniu kontrolnym przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Elementy toru pomiarowego zainstalowane w pomieszczeniu kontrolnym

Urządzenie Focusrite Clarett 8Pre USB zostało połączone z komputerem klasy PC, w którym zainstalowane było oprogramowanie Cockos Reaper. W programie tym dokonywana była rejestracja mierzonych przebiegów do plików wav o częstotliwości próbkowania 96 kS/s i rozdzielczości bitowej 24 bity. Zapis wyzwalany był synchronicznie z odtwarzaniem przebiegu wymuszającego. Uproszczony schemat toru pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.

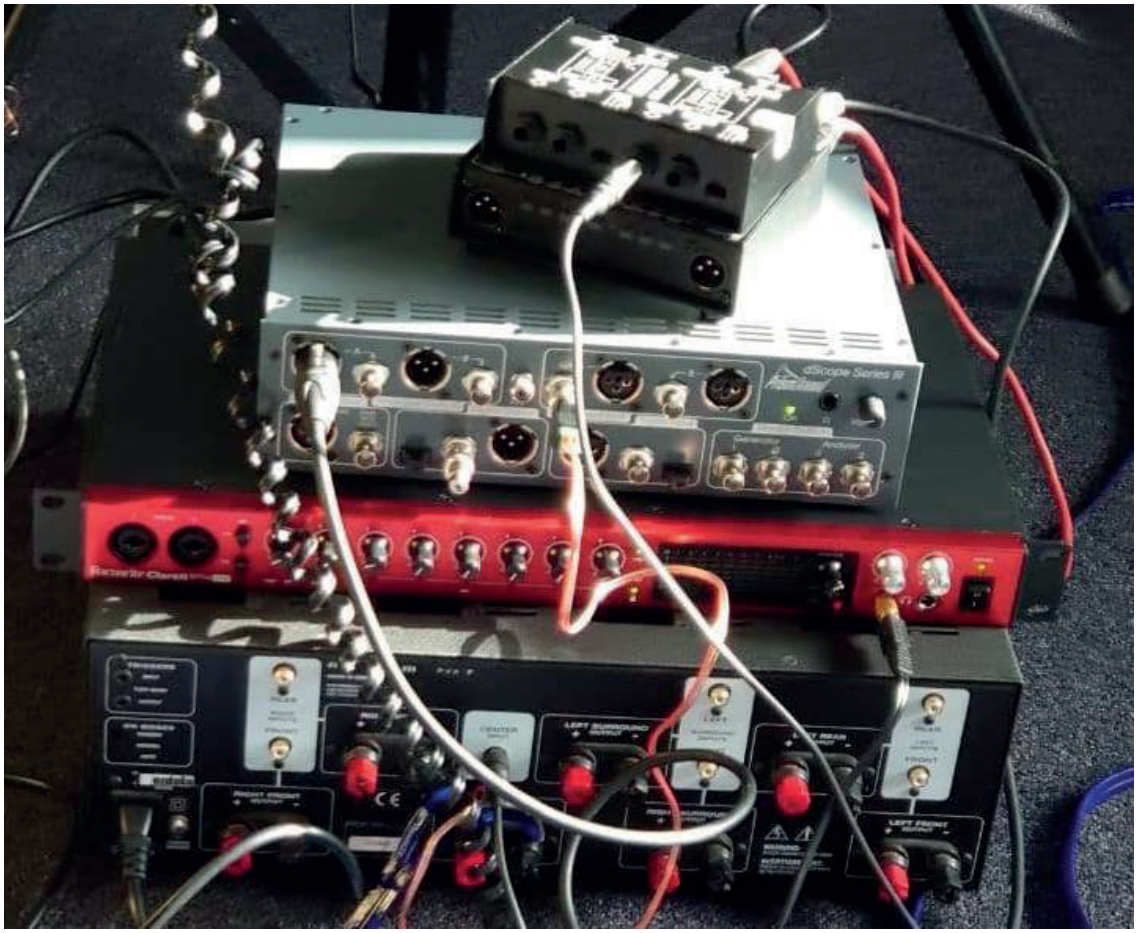


Rys. 5. Schemat blokowy toru pomiarowego. KOND – kondycjoner

Sygnałem wymuszającym był sinus przestrajany liniowo w zakresie częstotliwości 70–20 000 Hz, o długim czasie trwania. Sygnał ten zapisany był w pliku wav o częstotliwości próbkowania 96 kS/s i rozdzielczości bitowej 24 bity. Długość wektora próbek wynosiła 2^{22} = 4 194 304 próbki. Przy takim doborze parametrów aktywny czas trwania pojedynczego sygnału wymuszającego wynosił 36 s. Dolne ograniczenie zakresu częstotliwości wymuszenia wynikało z dolnej częstotliwości granicznej badanych głośników, która leży wyraźnie powyżej częstotliwości 70 Hz. Badanie skuteczności poniżej dolnej częstotliwości granicznej było niewskazane, ponieważ producent zaleca ostrożność przy pobudzaniu tych głośników w niskich częstotliwościach. Przy impedancji każdego z przetworników równej 4 Ω, mającej charakter głównie rezystancyjny, szczególnie zadbano, by woltomierz podłączony do wyjścia wzmacniacza mocy – równolegle z płaskim panelem głośnikowym – wskazywał wartość ~2,83 V.

4. Badanie charakterystyk elementów toru pomiarowego

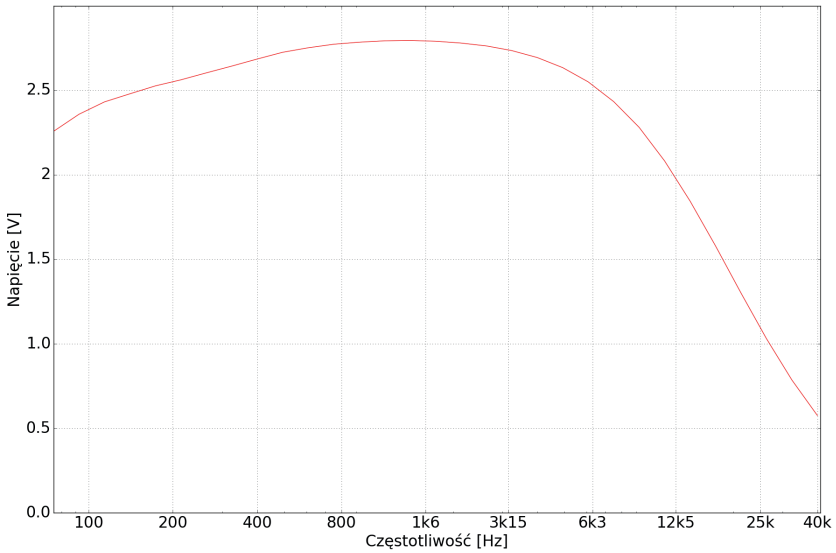
Pomiary charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych prowadzone były przy użyciu systemu Prism dScope III i po stronie nadawczej objęły następujące układy: sam wzmacniacz mocy, wzmacniacz mocy oraz DI, wzmacniacz mocy oraz przetwornik C/A, wzmacniacz mocy, przetwornik C/A oraz DI. Urządzenie Focusrite Clarett 8PRE USB zostało wykryte przez oprogramowanie Prism dScope jako karta dźwiękowa, stąd sygnał wymuszający został do niego dostarczony przez port USB. Każdy z pomiarów został powtórzony z obciążeniem czysto rezystancyjnym o wartości 4 Ω oraz z obciążeniem jednym z badanych płaskich paneli głośnikowych. Zestawiony tor pomiarowy przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Tor pomiarowy do badania charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych elementów toru pomiarowego wykorzystywanych w pomiarze głośnika DML

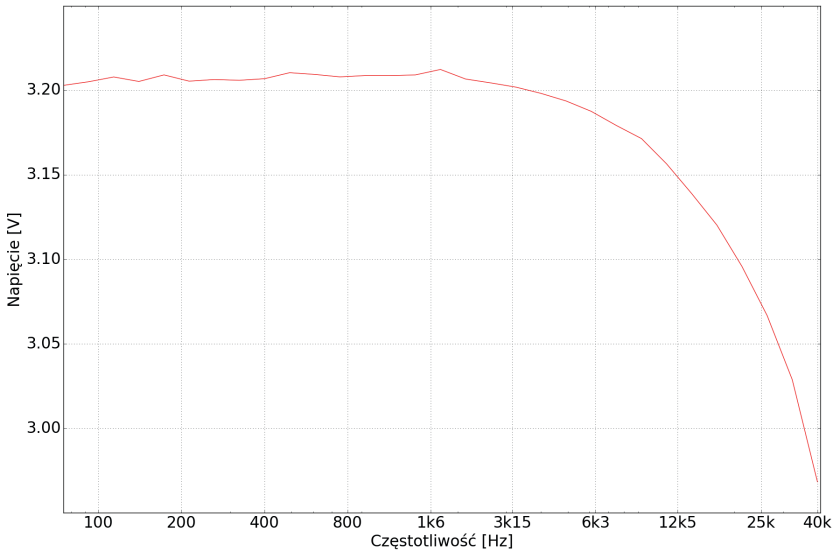
W pomiarze wykazany został istotny spadek poziomu napięcia przy częstotliwości 20 kHz na wyjściu wszystkich torów. Istotny spadek przy częstotliwości 70 Hz względem częstotliwości 1 kHz zaobserwowano tylko w przypadku urządzenia DI. W przypadku wszystkich badanych torów różnica poziomów między obciążeniem rezystancyjnym a obciążeniem głośnikiem DML nie przekroczyła 0,02 dB, co potwierdza rezystancyjny charakter impedancji głośników DML.

Głównym powodem odchylenia poziomów na krańcach pasma było urządzenie DI, a w konsekwencji największe odchylenie wnosił tor przetwornika C/A oraz DI i wzmacniacz mocy. Charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową tego układu przedstawiono na rysunku 7. Wartości napięcia na rysunkach 7 i 8 wynikają z nastawienia potencjometru analogowego na wyjściu urządzenia Focusrite. Wszystkie wyniki pomiarów charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych głośników DML zostały skorygowane zgodnie z (4). Rysunek 7 reprezentuje moduł $X(j\omega)$.



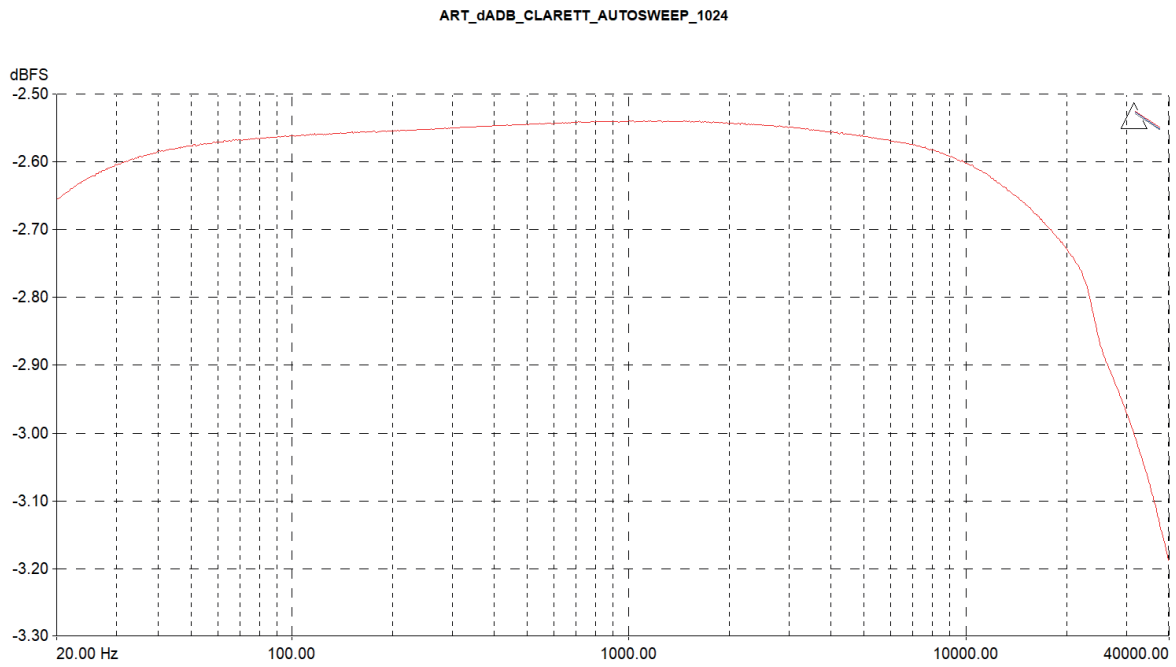
Rys. 7. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa układu przetwornika C/A oraz DI-box wraz z wzmacniaczem mocy, obciążonego głośnikiem DML. Liniowa skala napięcia

Na rysunku 8 zamieszczona została charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa powyższego układu, z pominięciem urządzenia DI.



Rys. 8. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa układu (przetwornika C/A) oraz wzmacniacza mocy, obciążonego głośnikiem DML. Liniowa skala napięcia

Dokonano również weryfikacji elementów toru pomiarowego po stronie odbiorczej. Założono przy tym, że zarówno mikrofon pola swobodnego G.R.A.S 46AE, jak również kondycjoner G.R.A.S 12AK podlegają okresowej kontroli oraz wzorcowaniu, w związku z czym ich charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe nie wpływają na wynik pomiaru. Zmierzona została jednak charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa układu składającego się z aktywnego urządzenia DI ART dADB oraz toru wejściowego urządzenia Focusrite Clarett 8Pre USB. Pomiar prowadzony był z użyciem techniki Bin-Centres, polegającej na pobudzeniu tylko tych składowych częstotliwościowych, których pełne okresy mieszczą się w buforze FFT, tak by nie było potrzeby okienkowania zarejestrowanego sygnału wynikowego. Sygnał wymuszający podawany był w postaci niesymetrycznej na wejściu urządzenia DI, z wyjścia którego – złączem symetrycznym – podawany był na wejście urządzenia Focusrite Clarett8Pre USB, skąd – z zastosowaniem połączenia symetrycznego – trafiał z powrotem na wejścia urządzenia Prism dScope Series III. Dodatkowo urządzenie Focusrite Clarett 8Pre USB otrzymywało sygnał synchronizacji z urządzenia Prism dScope Series III za pomocą złącza S/PDIF. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa układu ART dADBi i Focusrite Clarett 8Pre USB przedstawiona została na rysunku 9. Największy spadek charakterystyki toru odbiorczego występuje w górnym krańcu pasma i nie przekracza 0,2 dB, dlatego też zrezygnowano z korygowania wyników.



Rys. 9. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa układu ART dADBi i Focusrite Clarett 8Pre USB

5. Wnioski

Przeprowadzenie dokładnych pomiarów przetwornika elektroakustycznego niekonwencjonalnego typu wymaga szczegółowego planowania, ponieważ standardowo stosowane techniki mogą być nieprzydatne. Poznanie właściwości głośnika DML wymaga precyzyjnego pomiaru jego charakterystyk częstotliwościowych na całej półsferze. Za wskazane uznano na przykład zastosowanie separacji galwanicznej elementów toru pomiarowego, aby uniknąć pojawienia się w rejestrowanym sygnale składowej 50 Hz oraz jej harmonicznych. To z kolei spowodowało konieczność wprowadzenia odpowiedniej korekty charakterystyki częstotliwościowej. Jednak korekta ta byłaby niezbędna, nawet gdyby nie zastosowano separacji, ponieważ inne elementy toru również wprowadzają znaczące zniekształcenia liniowe. W przypadku wzmacniacza mocy okazały się one nieco większe niż deklarowane przez producenta.

Podziękowania

Autorzy pragną złożyć podziękowania pracownikom Laboratorium Akustyki Technicznej w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH, w szczególności panom dr. inż. Arturowi Flachowi, dr. inż. Jarosławowi Rubasze oraz mgr. inż. Bartłomiejowi Chojnackiemu za udostępnienie komory bezechowej oraz aparatury, a także przeszkolenie z użytkowania systemu pozycjonowania mikrofonu pomiarowego. Badania były częściowo finansowane z subwencji badawczej Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, nr 16.16.130.942/Czesak, oraz z projektu Zintegrowany Program Rozwoju Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie II, nr POWR.03.05.00-00-Z309/18-00.

Bibliografia

[1] N. Harris, *Spatial Bandwidth of Diffuse Radiation in Distributed-Mode Loudspeakers* , w: *111th AES Convention, 2001 September 21–24 New York, NY, USA,* AES, USA, 2001
[2] V.P. Gontcharov, N.P.R. Hill, V.J. Taylor, *Measurement Aspects of Distributed Mode Loudspeakers*, w: *106th AES Convention, 1999 May 8–11 Munich, Germany,* AES, USA, 1999
[3] S. Flanagan, N. Harris, *Loudness – a study of the subjective Loudness Difference between DML and Conventional Loudspeakers*, w: *106th AES Convention, 1999 May 8–11 Munich, Germany,* AES, USA, 1999
[4] P. Newell, K. Holland, *Loudspeakers: For music recording and reproduction*, Routledge, New York, 2019
[5] M.C. Heilemann, D.A. Anderson, S. Roesner, M.F. Bocko, *Quantifying Listener Preference of Flat-Panel Loudspeakers*, w: *145th AES Convention, 2018 October 17–20 New York, NY, USA,* AES, USA, 2018
[6] J.G. Tylka, E.Y. Choueiri, *On the Calculation of Full and Partial Directivity Indices*, 2014, http://www.princeton.edu/3D3A/Publications/Tylka_3D3A_DICalculation.html, dostęp 1.12.2021
[7] G.L. Wilson, *Directivity Factor: Q and R_θ? Standard Terminology and Measurement Methods*, Journal of Audio Engineerig Society 1973, vol. 21, s. 828–833
[8] G.L. Wilson, *More on the Measurement of the Directivity Factor*, Journal of Audio Engineerig Society 1974, vol. 22, s. 180–182
[9] T.W. Leishman, S. Rollins, H.M. Smith, *An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound*, Journal of the Acoustical Society of America 2006, vol. 120, s. 1411–1422