

dr inż. RAFAŁ MŁYŃSKI (ORCID: 0000-0002-0500-0638)
 dr inż. EMIL KOZŁOWSKI (ORCID: 0000-0003-4685-1145)
 dr inż. LESZEK MORZYŃSKI (ORCID: 0000-0003-3534-3284)
 inż. ADAM SWIDZIŃSKI (ORCID: 0000-0002-3362-013X)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: rmlynski@ciop.pl

DOI: 10.54215/BP.2021.11.8.Mlynski

Propozycje rozwiązań filtrowania sygnału w elektronicznych systemach przekazywania dźwięku



Fot. Corepics/Bigstockphoto

Właściwa percepcja dźwięków w środowisku pracy, najczęściej dźwiękowych sygnałów bezpieczeństwa, ale również ostrzeżeń słownych od współpracowników, wpływa na zwiększenie stopnia bezpieczeństwa przebywania w miejscu pracy. Istotne jest zatem, aby właściwości dźwięków przekazywanych z wykorzystaniem systemów elektronicznych były jak najlepiej dostosowane do możliwości ich odbioru przez pracownika – z uwzględnieniem warunków akustycznych panujących w miejscu użytkowania takich systemów. Właściwości dźwięku można dostosować poprzez wpływ na charakterystykę częstotliwościową sygnału, tj. jego filtrowanie. Celem artykułu jest przedstawienie propozycji rozwiązań, które mogłyby być użyte w elektronicznym systemie przekazywania dźwięków pracownikowi, umożliwiającym filtrowanie sygnału w pasmach częstotliwości. Przeanalizowano wymagania dotyczące właściwości pomiarowych filtrów pasmowych o szerokości oktawy. Przeprowadzono implementację filtrów o częstotliwościach środkowych z zakresu od 125 Hz do 8 kHz z wykorzystaniem filtrów cyfrowych w procesorze dźwięku. Duży stopień zgodności charakterystyk, które uzyskano w zrealizowanym rozwiązaniu, ze znormalizowanymi charakterystykami pomiarowymi wskazuje na przydatność zaproponowanego rozwiązania do wykorzystania w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi.

Słowa kluczowe: hałas, filtry pasmowe, filtry oktawowe, dźwięk, ochronniki słuchu

Proposals for signal filtering solutions in electronic sound transmission systems

Proper perception of sounds in the work environment, most often auditory danger signals, but also verbal warnings from co-workers, increases the degree of safe stay in the workplace. Hence, it is important that the properties of the sound transmitted to an employee with the use of electronic systems are as best as possible adapted to the possibility of its perception by that employee, taking into account the acoustic conditions in the place of use of such systems. Adjusting the sound properties can be realized by influencing the frequency response of the signal, i.e. its filtering. The aim of the article is to propose solutions that could potentially be used in an electronic system of transmitting sound to an employee, enabling filtering of the signal in frequency bands. The requirements for the properties of measurement octave-wide band filters were analysed. The implementation of filters with a centre frequency ranging from 125 Hz to 8 kHz with the use of digital filters in the sound processor was carried out. The high degree of compliance of the characteristics obtained in the implemented solution with the standardized measurement characteristics indicates the suitability of the proposed solution for use in sound transmission systems to an employee.

Keywords: noise, band-pass filters, octave-band filters, sound, hearing protectors

Wstęp

W trakcie wielu zadań wykonywanych przez pracownika słuchu, obok wzroku, pełni bardzo ważną rolę w dostarczaniu informacji o otaczającej go rzeczywistości. W określonych sytuacjach dźwięk służy do komunikacji ze współpracownikami, również z wykorzystaniem elektronicznych urządzeń, które go przekazują. Ten proces może być realizowany dzięki zastosowaniu ochronników słuchu, wyposażonych w układy elektroniczne, a więc z założenia dotyczy to sytuacji przebywania w zasięgu hałasu, również wtedy, gdy poziom dźwięku osiąga względnie duże wartości w określonych przedziałach czasu. Hałas, ze względu na maskowanie innych dźwięków, w tym użytecznych w środowisku pracy – takich jak sygnały ostrzegawcze (generowane przez maszyny lub urządzenia) czy dźwięki mowy – ma niekorzystny wpływ na ich prawidłowy odbiór. Właściwa percepcja dźwięków, najczęściej dźwiękowych sygnałów bezpieczeństwa oraz ostrzeżeń słownych od współpracowników, wpływa na zwiększenie stopnia bezpiecznego przebywania w miejscu pracy. Dlatego tak istotna jest rola systemów przekazywania dźwięku pracownikom i możliwie najlepsze dostosowanie jego właściwości do możliwości odbioru z uwzględnieniem warunków akustycznych panujących w miejscu użytkowania tych systemów.

Dostosowanie parametrów dźwięku użytecznego jest wymagane np. podczas projektowania dźwiękowych sygnałów bezpieczeństwa, gdzie zwraca się uwagę na właściwe rozróżnienie takiego sygnału od tła akustycznego, przy czym uwzględnia się co najmniej dwa z trzech aspektów: poziom ciśnienia akustycznego, charakterystykę częstotliwościową (widmo sygnału) oraz przebieg czasowy sygnału [1]. Dostosowywanie właściwości, czyli kształtowanie sygnału w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi, może się odbywać poprzez wpływ na charakterystykę częstotliwościową sygnału, czyli na poziom tego sygnału w określonych pasmach częstotliwości. Ten proces ogólnie nazywa się filtrowaniem sygnału.

Celem artykułu jest przedstawienie propozycji rozwiązań możliwych do zastosowania w elektronicznym systemie przekazywania dźwięku pracownikowi, zapewniającym filtrowanie sygnału w pasmach częstotliwości.

Sposób podziału sygnału na pasma częstotliwości

Kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej sygnału wymaga jego podziału na pasma częstotliwości. Systemy przekazywania pracownikowi dźwięku mogą być elementem toru komunikacyjnego, na którego końcu znajduje się przetwornik elektroakustyczny, np. miniaturowy głośnik zamontowany w zestawie słuchawkowym lub ochronniku słuchu. Taki system powinien zawierać odpowiednią i jednocześnie możliwie niewielką liczbę pasm częstotliwości, w których kształtowany ma być sygnał, aby prawdopodobnie było zrealizowanie intuicyjnego interfejsu obsłu-

gi takiego systemu. Oprócz tego liczba i rodzaj pasm częstotliwości powinny być odpowiednie ze względu na potencjalne zastosowania systemu przekazywania dźwięku zawierającego funkcjonalność kształtowania charakterystyki częstotliwościowej sygnału. W zagadnieniach, w których rozpatruje się parametry związane z wytwarzaniem, rozchodzeniem się i odbiorem dźwięków w przypadku mowy, sygnałów ostrzegawczych i ochronników słuchu, analizę sygnałów najczęściej przeprowadza się w pasmach częstotliwości o szerokości oktawy lub jej części (np. 1/3 oktawy) [2-5]. Podział częstotliwości na takie pasma spełnia zasadę stałej względnej szerokości tych pasm, tzn. im większa jest rozpatrywana częstotliwość, tym większa jest szerokość pasma częstotliwości. W ten sposób cały zakres rozpatrywanych częstotliwości zostaje pokryty stosunkowo niewielką liczbą pasm, co upraszcza analizy z zachowaniem odpowiedniego do zastosowań stopnia liczności analizowanych grup danych. Analiza w pasmach o szerokości oktawy lub jej części jest powszechnie stosowana w zagadnieniach dotyczących akustyki i uwzględniana również w najnowszych rozwiązaniach [6].

W związku z tym, że filtrowanie sygnału może być zaimplementowane w układzie wbudowanym w ochronnik słuchu, należy mieć na uwadze, że podstawowy dobór ochronników słuchu, z zastosowaniem metody pasm oktaowych, przeprowadza się z wykorzystaniem danych w pasmach oktaowych [7, 8] o częstotliwościach środkowych: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz i 8000 Hz. W tych pasmach charakteryzowane są również właściwości ochronników słuchu, tj. tłumienia dźwięku. Co prawda jest ono mierzone w obecności sygnału testowego, generowanego w pasmach częstotliwości o szerokości 1/3 oktawy, co wynika z właściwości percepcji dźwięku, niemniej dotyczy to jedynie sposobu wytwarzania sygnału testowego, a uzyskane wyniki rozpatruje się w pasmach, których częstotliwości środkowe oddalone są o oktawę, i stosuje się je razem z parametrami hałasu mierzonymi w pasmach oktaowych.

W odniesieniu do możliwości dopasowania charakterystyki częstotliwościowej do dźwiękowych sygnałów bezpieczeństwa (sygnałów ostrzegawczych) warto zauważyć, że niezależnie od tego, że dominująca część energii sygnału może być skupiona w wąskim pasmie częstotliwości, np. w określonym pasmie tercjowym, to analizę takich sygnałów, zgodnie z normą dotyczącą ich projektowania, można przeprowadzić zarówno w pasmach częstotliwości o szerokości 1/3 oktawy, jak i o szerokości oktawy [1].

Korekcja częstotliwościowa realizowana w pasmach oktaowych jest również szeroko stosowana w sprzęcie powszechnego użytku oraz aplikacjach urządzeń przenośnych służących do odtwarzania muzyki i filmów. Należy zaznaczyć, że wspomniany górny zakres rozpatrywanych częstotliwości, tj. oktawa o częstotliwości środkowej 8 kHz, obejmuje z nadmiarem górną granicę zakresu częstotliwości pasma telefonicznego

i pasma uwzględnianego w kanałach komunikatorów internetowych.

Analiza i korekcja dźwięku w oktaowych pasmach częstotliwości jest zatem najczęściej stosowana i jednocześnie wystarczająca ze względu na cel, tj. użycie do filtrowania sygnału w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi. Ten rodzaj korekcji charakterystyki częstotliwościowej został więc zaproponowany do realizacji układu filtrowania sygnału, aby sprawdzić możliwość kształtowania charakterystyki częstotliwościowej tego sygnału. Uwzględnione przy tym będą pasma oktaowe o częstotliwościach środkowych mieszczących się w zakresie od 125 Hz do 8 kHz.

Parametry filtrów pasmowych o szerokości oktawy

Mimo że układ filtrowania sygnału, przeznaczony do kształtowania charakterystyki częstotliwościowej w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi, nie jest układem pomiarowym, to przy projektowaniu jego właściwości można się posłużyć wskazówkami zawartymi w normie PN-EN 61260-1 [9], dotyczącej właściwości filtrów pasmowych o szerokości oktawy i części oktawy. Zakres częstotliwości uwzględnianych w układzie filtrowania sygnału, wynikający z szerokości rozpatrywanych pasm oktaowych o wartościach nominalnych częstotliwości środkowych od 125 Hz do 8 kHz, wyznaczony na podstawie informacji z wymienionej normy, mieści się w przedziale od 89 Hz do 11 220 Hz. Zestawienie wybranych parametrów filtrów o szerokości oktawy w przypadku poszczególnych rozpatrywanych pasm oktaowych przedstawiono w tab. 1. Wartości liczbowe wyznaczono zgodnie z metodyką opisaną w normie [9].

Na podstawie normy PN-EN 61260-1 można wyznaczać kształt charakterystyk częstotliwościowych filtrów o szerokości oktawy i jej części. Filtr spełniający wymagania normy powinien mieć taki przebieg charakterystyki częstotliwościowej, aby jego wartości mieściły się pomiędzy minimalnymi i maksymalnymi wielkościami obliczonymi według zależności zamieszczonych w normie. Filtr może być zrealizowany zgodnie z wymaganiami określonymi wobec jednej z dwóch klas zdefiniowanych w tej samej normie. Ponieważ filtry przeznaczone do zaimplementowania w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi nie stanowią wyposażenia pomiarowego, ogólnie nie muszą spełniać którejkolwiek z klas filtrów. Założono jednak, że w projektowanym rozwiązaniu będzie się dążyć do uzyskania charakterystyk filtru zbliżonych do wymagań określonych w odniesieniu do klasy 2 filtrów. Na rys. 1. przedstawiono (jako przykład) tzw. granice akceptacji czyli górną i dolną granicę dopuszczalnych wartości (tj. wartości minimalne i maksymalne) charakterystyki częstotliwościowej tłumienia filtru oktaowego klasy 2, o nominalnej częstotliwości środkowej pasma oktaowego wynoszącej 1000 Hz.

Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów filtrów o szerokości oktawy, wyznaczonych zgodnie z PN-EN 61260-1 [9]

Table 1. List of selected octave-band filter parameters determined in accordance with the PN-EN 61260-1 [9]

f_{nom} [Hz]	f_m [Hz]	x	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]
125	125,89	-3	89,125	177,83
250	251,19	-2	177,83	354,81
500	501,19	-1	354,81	707,95
1000	1000,0	0	707,95	1412,5
2000	1995,3	1	1412,5	2818,4
4000	3981,1	2	2818,4	5623,4
8000	7943,3	3	5623,4	11220

Oznaczenia:

- f_{nom} – częstotliwość nominalna środkowa pasma oktawowego
- f_m – częstotliwość dokładna środkowa pasma oktawowego
- x – indeks pasma częstotliwości (częstotliwość odniesienia wynosi 1000 Hz)
- f_1 – częstotliwość dokładna dolna pasma oktawowego
- f_2 – częstotliwość dokładna górna pasma oktawowego

Designations:

- f_{nom} – nominal mid-octave-band frequency
- f_m – exact mid-octave-band frequency
- x – frequency band index (the reference frequency is 1000 Hz)
- f_1 – lower octave-band-edge frequency
- f_2 – upper octave-band-edge frequency

Analogiczny będzie przebieg charakterystyk częstotliwościowych tłumienia filtrów o innych nominalnych częstotliwościach środkowych niż 1000 Hz. Na rys. 2., oprócz pokazanych już charakterystyk filtru o nominalnej częstotliwości środkowej pasma oktawowego wynoszącej 1000 Hz, na wspólnym wykresie zaprezentowano wartości minimalne i maksymalne (górne i dolne granice dopuszczalnych wartości) charakterystyk

częstotliwościowych tłumienia filtrów oktawowych klasy 2 o częstotliwościach nominalnych 500 Hz i 2000 Hz. W przypadku pozostałych pasm, poza trzema uwzględnionymi na rys. 2., przebiegi charakterystyk będą podobne, lecz przesunięte odpowiednio w lewo lub prawo na osi częstotliwości.

Dane liczbowe niezbędne do wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych tłumienia

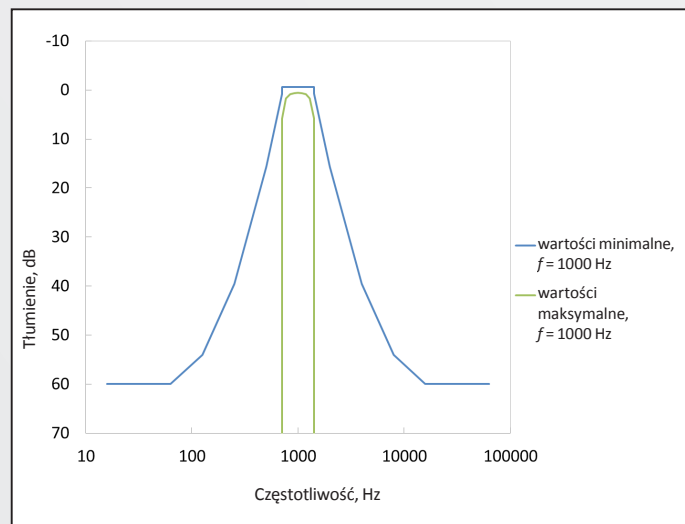
filtrów o szerokości oktawy, przedstawionych na rys. 1 i 2., zestawiono w tab. 2. Znalazły się tam również wyznaczone wartości nachylenia poszczególnych odcinków charakterystyk częstotliwościowych filtrów. Dane w formie liczbowej są pomocne na etapie projektowania filtrów cyfrowych realizujących zakładaną funkcjonalność kształtowania sygnału. Analogiczne dane wyznacza się dla pozostałych rozpatrywanych pasm częstotliwości.

Implementacja filtrów

Implementację filtrów o parametrach określonych w sposób przedstawiony w tab. 1. i 2., w przypadku częstotliwości środkowych tych filtrów o wartościach z zakresu od 125 Hz do 8 kHz, przeprowadzono z zastosowaniem filtrów cyfrowych w procesorze dźwięku. Wykorzystano przeznaczone do tego celu środowisko programistyczne, w którym zdefiniowano parametry filtrów oraz przeprowadzono symulacje pozwalające na ocenę projektowanego rozwiązania. Gdy uzyskano zadowalające efekty implementacji filtrów z użyciem środowiska programistycznego, dokonano pomiarów zrealizowanego w procesorze dźwięku układu filtrowania sygnału.

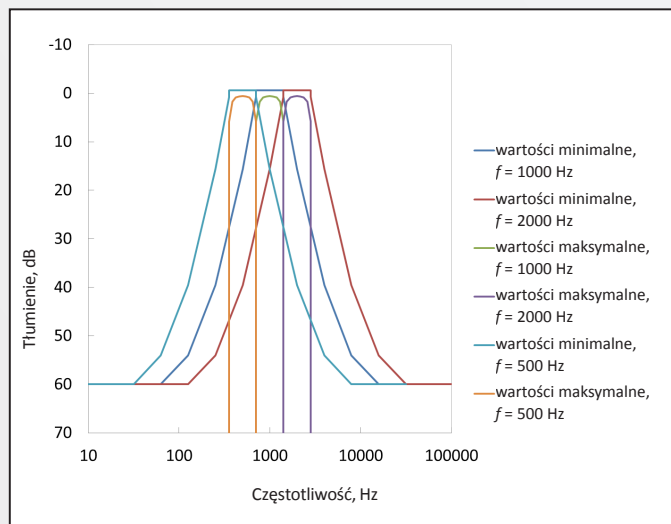
Układ pomiarowy

Poprawność przygotowanego programu sterującego pracą procesora dźwięku, który posłużył do stworzenia układu filtrowania sygnału, sprawdzono z zastosowaniem układu ewaluacyjnego procesora. Działanie filtrów skontrolowano, badając ich charakterystyki częstotliwościowe tłumienia na wyjściu przetwornika cyfrowo-analogowego. W tym celu zestawiono układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.



Rys. 1. Górna i dolna granica dopuszczalnych wartości (wartości minimalne i maksymalne) charakterystyki częstotliwościowej tłumienia filtru oktawowego klasy 2 o nominalnej częstotliwości środkowej pasma oktawowego wynoszącej 1000 Hz, na podstawie PN-EN 61260-1

Fig. 1. Minimum and maximum acceptance limits on relative attenuation in dB for Class 2 octave-band filter with nominal mid-octave-band frequency of 1000 Hz based on the PN-EN 61260-1



Rys. 2. Górne i dolne granice dopuszczalnych wartości (wartości minimalne i maksymalne) charakterystyk częstotliwościowych tłumienia filtrów oktawowych klasy 2 o nominalnych częstotliwościach środkowych pasm oktawowych wynoszących 500 Hz, 1000 Hz oraz 2000 Hz, wyznaczone na podstawie PN-EN 61260-1

Fig. 2. Minimum and maximum acceptance limits on relative attenuation in dB for Class 2 octave-band filters with nominal mid-octave-band frequencies of 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz based on the PN-EN 61260-1

Tabela 2. Wartości liczbowe określające charakterystyki częstotliwościowe filtrów klasy 2 o szerokości oktawy (nominalne częstotliwości środkowe pasm oktawowych f_{nom} , wynoszące 500, 1000 i 2000 Hz, oraz wartości nachyleń poszczególnych odcinków charakterystyk wyznaczono wg PN-EN 61260; k – indeks wiersza)

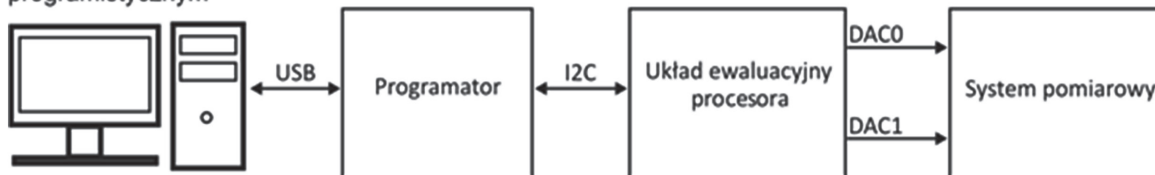
Table 2. Numeric values for the frequency characteristics of Class 2 octave-band filters (nominal mid-octave-band frequency f_{nom} of 500, 1000 and 2000 Hz and the values of the slopes of individual sections of the characteristics were determined in accordance with PN-EN 61260; k – row index)

Częstotliwość [Hz]			Tłumienie względne [dB]		k	Nachylenie* [dB/okt.]	
$f_{nom} = 500 \text{ Hz}^*$	$f_{nom} = 1000 \text{ Hz}^*$	$f_{nom} = 2000 \text{ Hz}^*$	min.	maks.		min.	maks.
7,94	15,85	31,62	60	∞	1	0	–
15,85	31,62	63,10	60	∞	2	0	–
31,62	63,10	125,89	60	∞	3	6,0	–
63,10	125,89	251,19	54	∞	4	14,5	–
125,89	251,19	501,19	39,5	∞	5	24,0	–
251,19	501,19	1000,0	15,6	∞	6	25,3	–
354,81	707,95	1412,5	0,8	∞	7	–	–
354,81	707,95	1412,5	-0,6	5,8	8	0	17,5
386,81	771,79	1539,9	-0,6	1,7	9	0	3,7
421,70	841,40	1678,8	-0,6	0,9	10	0	1,0
459,73	917,28	1830,2	-0,6	0,7	11	0	0,6
501,19	1000,0	1995,3	-0,6	0,6	–	–	–
546,39	1090,2	2175,2	-0,6	0,7	13	0	0,6
595,66	1188,5	2371,4	-0,6	0,9	14	0	1,0
649,38	1295,7	2585,2	-0,6	1,7	15	0	3,7
707,95	1412,5	2818,4	-0,6	5,8	16	0	17,5
707,95	1412,5	2818,4	0,8	∞	17	–	–
1000,0	1995,3	3981,1	15,6	∞	18	25,3	–
1995,3	3981,1	7943,3	39,5	∞	19	24,0	–
3981,1	7943,3	15 849	54	∞	20	14,5	–
7943,3	15 849	31 623	60	∞	21	6,0	–
15 849	31 623	63 096	60	∞	22	0	–
31 623	63 096	125 893	60	∞	23	0	–

* Wartość nachylenia zamieszczona w wierszu o indeksie k dotyczy nachylenia między punktami charakterystyki określonymi przy częstotliwościach $f(k)$ i $f(k+1)$, gdy $k = 1:11$, oraz przy częstotliwościach $f(k)$ i $f(k-1)$, gdy $k = 13:23$.

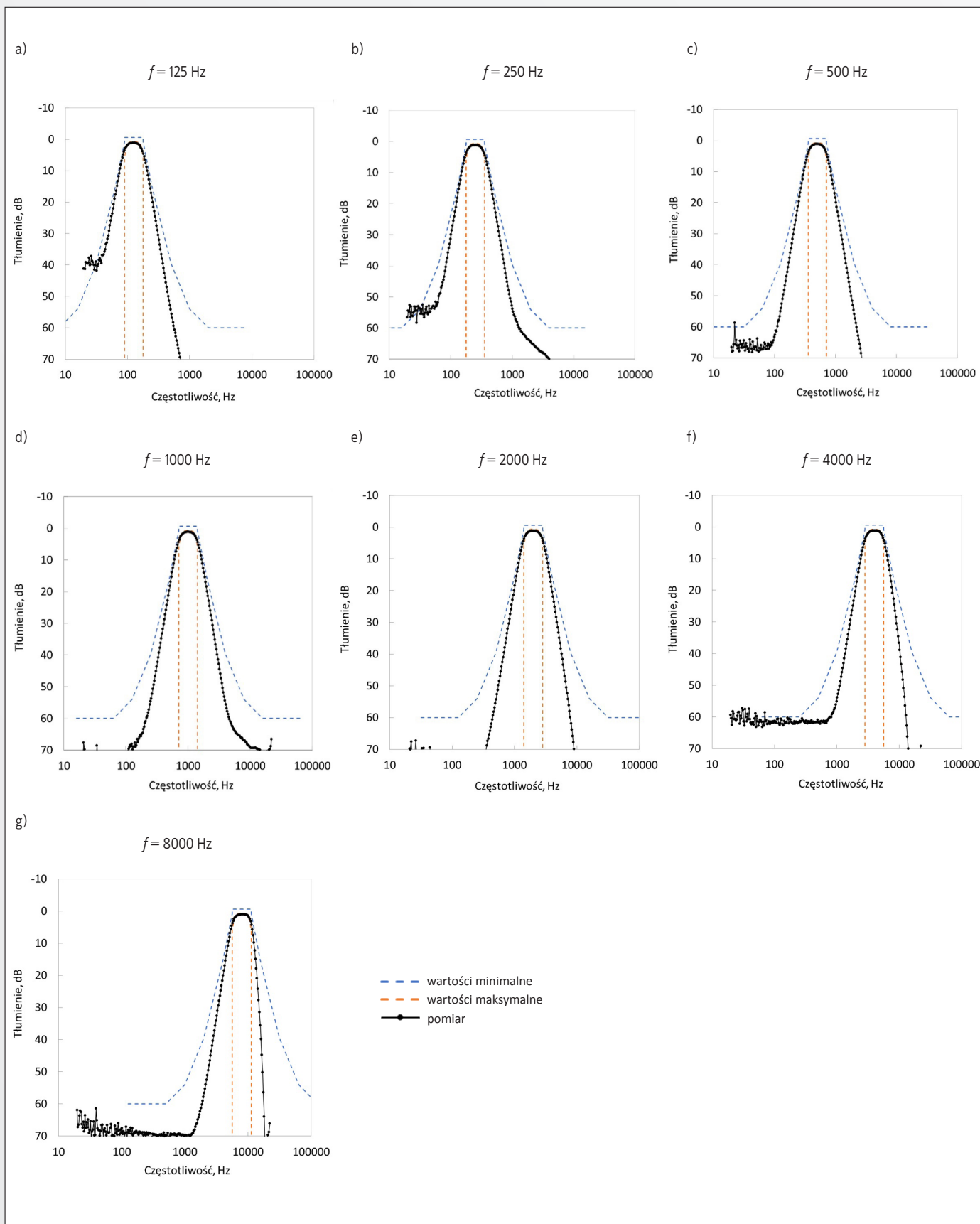
* The value of the slope in the row with index k refers to the slope between the points of the characteristic determined at frequencies $f(k)$ and $f(k+1)$, when $k = 1:11$, and at frequencies $f(k)$ and $f(k-1)$, when $k = 13:23$.

Komputer ze środowiskiem programistycznym



Rys. 3. Układ pomiarowy do sprawdzania poprawności oprogramowania tworzącego filtry oktawowe i badania właściwości tych filtrów; I2C – magistrala transmisji danych cyfrowych

Fig. 3. Measurement system for checking the correctness of software creating octave-band filters and testing the properties of these filters; I2C – digital data transmission bus



Rys. 4. Zmierzona charakterystyka częstotliwościowa tłumienia filtra oktawowego o częstotliwości środkowej 125 Hz (a), 250 Hz (b), 500 Hz (c), 1000 Hz (d), 2000 Hz (e), 4000 Hz (f) i 8000 Hz (g), zaimplementowanego w procesorze dźwięku, oraz odpowiednie wartości minimalne i maksymalne (górne i dolne granice dopuszczalnych wartości) charakterystyk częstotliwościowych tłumienia filtrów oktawowych klasy 2

Fig. 4. Measured characteristic of implemented in the sound processor octave-band filter with a mid-band frequency of 125 Hz (a), 250 Hz (b), 500 Hz (c), 1000 Hz (d), 2000 Hz (e), 4000 Hz (f) and 8000 Hz (g), and the corresponding minimum and maximum acceptance limits on relative attenuation in dB for Class 2 octave-band filters

Do badań charakterystyk częstotliwościowych wykorzystano moduł pomiarowy Brüel & Kjær PULSE 3052-A-030, wyposażony w panel z wejściami liniowymi. Do jednego z wejść modułu pomiarowego podłączono wyjście przetwornika DAC0 procesora dźwięku (szum niefiltrowany), a do drugiego – sygnał z wyjścia przetwornika DAC1 (szum przefiltrowany). Układ ewaluacyjny procesora dźwięku był połączony poprzez programator z komputerem ze specjalnym środowiskiem programistycznym, które umożliwiło zmianę parametrów programu wykonywanego na procesorze dźwięku w trakcie badań. Zmiany polegały na tym, że podczas badań sygnał szumu podawano tylko na jeden z filtrów. Sygnały wychodzące na pozostałe filtry były wyciszane (redukowane) za pomocą bloku regulacji sygnału. Te wychodzące z przetworników DAC0 i DAC1 procesora dźwięku, w przypadku poszczególnych filtrów o częstotliwości środkowej z zakresu od 125 Hz do 8 kHz, były rejestrowane za pomocą modułu pomiarowego. Analiza zarejestrowanych sygnałów była realizowana jako tzw. post-analiza z wykorzystaniem przeznaczonego do systemu PULSE oprogramowania BK Connect 2019 w wersji 23.0.0.855 oraz Brüel & Kjær PULSE LabShop w wersji 21.0.0.671.

Charakterystyki częstotliwościowe tłumienia zrealizowanych filtrów

Wyniki pomiarów charakterystyk częstotliwościowych tłumienia filtrów o częstotliwości środkowej od 125 Hz do 8000 Hz przedstawiono na rys. 4. Wykresy wskazują na duży stopień zgodności przebiegu charakterystyk tłumienia filtrów z charakterystykami częstotliwościowymi tłumienia filtrów oktaowych klasy 2 według PN-EN 61260-1. Nieznaczne przekroczenia przez charakterystyki tłumienia filtrów wartości zdefiniowanych normą występują jedynie w zakresie bardzo niskich częstotliwości, do ok. 30-70 Hz, w miejscach, gdzie tłumienie sygnału przyjmuje względnie duże wartości, tj. od przeszło 37 dB (w przypadku filtru o częstotliwości środkowej 125 Hz) do 57 dB (w przypadku filtru o częstotliwości środkowej 4000 Hz). Takie przekroczenia nie będą jednak miały istotnego wpływu na funkcjonowanie filtrów w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi. Jak już zresztą wspomniano, filtry przeznaczone do wykorzystania w takich systemach nie stanowią wyposażenia pomiarowego i nie muszą spełniać którejkolwiek z klas filtrów. Mimo że charakterystyki filtrów w niektórych punktach nieznacznie przekraczają wartości zdefiniowane normą, to jednak proponowane rozwiązanie można uznać za satysfakcjonujące, które spełni swoje zadanie. O wysokiej jakości tego rozwiązania świadczy duży stopień zgodności jego charakterystyk z charakterystykami normowymi.

Należy również dodać, że pokazany wysoki stopień zgodności charakterystyk częstotliwościowych tłumienia sygnału uzyskanych na jego wyjściu elektrycznym z charakterystykami teore-

tycznymi jest wystarczający, a wręcz nadmiarowy, biorąc pod uwagę ograniczenia związane z samym odtworzeniem sygnału z użyciem przetwornika elektroakustycznego, tj. np. głośnika miniaturowego. Generalnie przetwarzanie przez głośnik sygnału elektrycznego na akustyczny związane jest z występowaniem pewnych opóźnień w pojawieniu się sygnału akustycznego względem momentu wystąpienia zmiany poziomu sygnału elektrycznego dostarczanego do zacisków tego głośnika. Dodatkowo wartość opóźnienia jest zależna od częstotliwości sygnału. Parametr ten nazywany jest opóźnieniem grupowym. Oznacza to, że faktycznym ograniczeniem w uzyskaniu odpowiednio stromo nachylonych charakterystyk częstotliwościowych w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi, przy tak dużym stopniu zgodności charakterystyk częstotliwościowych na wyjściu elektrycznym z charakterystykami teoretycznymi, będą elementy wytwarzające sygnał akustyczny, tj. głośniki.

Podsumowanie

Preferowanym sposobem regulacji charakterystyki częstotliwościowej tłumienia sygnału w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi jest filtracja tego sygnału w oktaowych pasmach częstotliwości. Częstotliwości środkowe pasm oktaowych mają odpowiadać częstotliwościom środkowym pasm standardowo rozpatrywanych w przypadku określania parametrów hałasu i właściwości dobieranego ochronnika słuchu, tj. muszą się mieścić w zakresie od 125 Hz do 8000 Hz. Ten zakres jest w pełni wystarczający, biorąc pod uwagę pasmo kanałów telefonii i komunikatorów internetowych oraz właściwości miniaturowych przetworników elektroakustycznych, które mogą być wykorzystywane w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi. Badania charakterystyk częstotliwościowych filtrów cyfrowych, zaimplementowanych z wykorzystaniem procesora dźwięku, w zestawieniu z charakterystykami częstotliwościowymi filtrów oktaowych klasy 2, określonymi według PN-EN 61260-1, potwierdziły duży stopień zgodności charakterystyk uzyskanych w zrealizowanym rozwiązaniu (na wyjściu elektrycznym sygnału) z określonymi w normie. Co prawda filtry przeznaczone do wykorzystania w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi nie stanowią wyposażenia pomiarowego, a więc nie muszą spełniać którejkolwiek z klas filtrów, niemniej jednak duży stopień zgodności charakterystyk realizowanego układu z charakterystykami zdefiniowanymi w wymienionej normie świadczy o wysokiej jakości zaimplementowanego rozwiązania. Faktyczne ograniczenia w uzyskaniu odpowiednio stromych charakterystyk częstotliwościowych tłumienia sygnału wytwarzanego w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi będą wynikały z właściwości przetworników elektroakustycznych, a nie właściwości układów realizujących filtrowanie sygnału.

Co równie istotne, przygotowane rozwiązanie kwalifikuje się do wykorzystania w systemach przekazywania dźwięku pracownikowi ze względu na stosunkowo niskie koszty i tym samym dostępność dla szerokiego grona potencjalnych użytkowników. Wyniki uzyskane podczas przeprowadzonych prac koncepcyjnych i pomiarowych pozwalają sądzić, że opracowane rozwiązanie, w którym filtry pasmowe zostały zaimplementowane z wykorzystaniem procesora dźwięku, zostanie w przyszłości zainstalowane w opracowywanych systemach przekazywania dźwięku pracownikowi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN ISO 7731:2009 Ergonomia – Sygnały bezpieczeństwa dla obszarów publicznych i obszarów pracy – Dźwiękowe sygnały bezpieczeństwa.
- [2] PÖRSCHMANN, C., LÜBECK, T., AREND, J.M. Impact of face masks on voice radiation. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2020, 148(6): 3663-3670, doi: 10.1121/10.0002853.
- [3] GOVERTS, S.T., COLBURN, H.S. Binaural Recordings in natural acoustic environments: estimates of speech-likeness and interaural parameters. *Trends in Hearing*. 2020, 24, doi: 10.1177/2331216520972858.
- [4] ELSEIN, K.M., SCHADY, A. Influence of meteorological conditions on sound propagation of a wind turbine in complex terrain. *Proceedings of Meetings on Acoustics*. 2020, 41(1), doi: 10.1121/2.0001351.
- [5] ŻYSZKOWSKI, Z. Podstawy elektroakustyki. Warszawa: WNT, 1984.
- [6] D'ANDREA FONSECA, W., JACOMUSSI, L., MAREZE, P.H. Raspberry Pi: A low-cost embedded system for sound pressure level measurement. *Proceedings of 2020 International Congress on Noise Control Engineering, INTER-NOISE, 2020*.
- [7] PN-EN ISO 4869-2:2018-12 Akustyka – Ochronniki słuchu – Część 2: Szacowanie efektywnych poziomów dźwięku A pod ochronnikami słuchu.
- [8] PN-EN 458:2016-06 Ochronniki słuchu – Zalecenia dotyczące doboru, użytkowania, konserwacji codziennej i okresowej – Dokument przewodni.
- [9] PN-EN 61260-1:2015-01 Elektroakustyka – Filtry pasmowe o szerokości oktawy i części oktawy – Część 1: Wymagania.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021-2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków ministra właściwego ds. pracy (zadanie nr 2.SP.03 pt. „Opracowanie systemu przekazywania dźwięku pod ochronnik słuchu sterowanego bezprzewodowo przez użytkownika”).
Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*