

Projektowanie zwrotnic głośnikowych, część 1

Drodzy Czytelnicy chciałbym Wam przekazać wiedzę dzięki, której łatwiej będzie Wam projektować zwrotnice głośnikowe, a dźwięk Waszych zestawów głośnikowych będzie lepszej jakości. Chciałbym, aby ten artykuł był uzupełnieniem kursu prowadzonego na łamach EP przez Andrzeja Kisiela.

Nie ma jednego, idealnego sposobu zaprojektowania zespołu głośnikowego. Wiele firm wypracowało własne rozwiązania i promuje swoje technologie. Zastosowano w nich różne projekty i założenia dotyczące zwrotnic. Niektóre firmy od lat stosują proste filtry pierwszego rzędu, podczas gdy inne znacznie bardziej rozbudowane układy filtrów. Nie będę twierdził, które rozwiązania są najlepsze, a o których najlepiej zapomnieć. Nie ma uniwersalnego „sposobu” na zwrotnicę. Celem tego artykułu jest opisanie zarysu metod projektowania, tak aby uwzględnić zjawiska elektryczne i akustyczne oraz ograniczenia z nimi związane. Mam nadzieję, iż informacje zawarte w tym artykule pozwolą na uniknięcie wielu błędów i rozwiązanie powstałych.

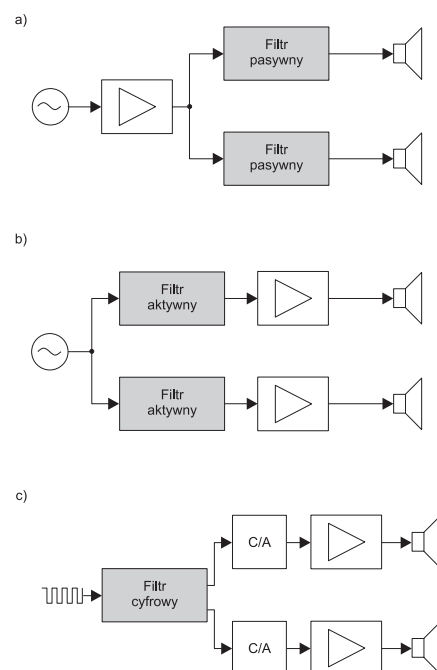
Na początku musimy sobie jasno powiedzieć czym jest zwrotnica i jakie funkcje realizuje. Umownie przyjmuje się, iż pasmo audio to częstotliwości z zakre-

su 20...20000 Hz. Pasma to jest podzielone na kilka podzakresów (także umownych), jak pokazano w **tab. 1**.

Do dyspozycji mamy różne rodzaje głośników, które służą do odtwarzania określonych zakresów pasma audio. Jeżeli sygnał wysokotonowy będziemy odtwarzali na głośniku basowym to jakość i głośność odtworzonych dźwięków będzie niska. Jednakże, gdy spróbujemy odtwarzać średnie tony lub basy na głośniku wysokotonowym to najprawdopodobniej nieodwracalnie go uszkodzimy.

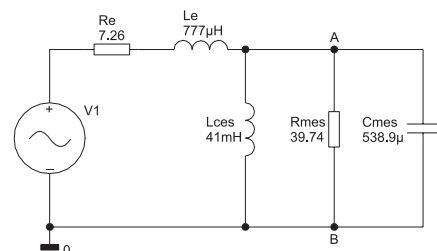
Podstawowym zadaniem zwrotnicy jest kierowanie sygnałów do głośników przeznaczonych do ich odtwarzania. Dodatkowo zwrotnica może także tłumić szkodliwe rezonanse głośników oraz wyrównywać charakterystykę przetwarzania zespołu głośnikowego. Zwrotnica jest filtrem kształtującym sygnał dostarczany do głośników.

Istnieje wiele podziałów zwrotnic. Zastanówmy się, gdzie w torze audio może być ona umieszczona. Na **rys. 1a** zwrotnica jest umieszczona między wzmacniaczem i głośnikami. Jest to zwrotnica pasywna – do swego działania nie potrzebuje zasilania. Jest to rozwiązanie najczęściej spotykane. Zaletą zwrotnic pasywnych jest zastosowanie tylko jednego wzmacniacza mocy oraz stosunkowo mały stopień skomplikowania. Najprostszą zwrotnicę można zbudować z wykorzystaniem tylko jednego kondensatora. Niestety ma ona wiele wad. Moc wzmacniacza jest tracona w elementach filtru i tylko jej część dostarczana jest do głośników. W związku z tym komponenty takiego układu muszą być w stanie wydzielić znaczną moc. Kolejną jej wadą jest umiejscowienie filtru w torze audio, które ogranicza współczynnik tłumienia wzmacniacza. Głośnik sterowany jest przez wzmacniacz poprzez zwrotnicę, więc wszystkie rezystancje i impedancje występujące w tym po-



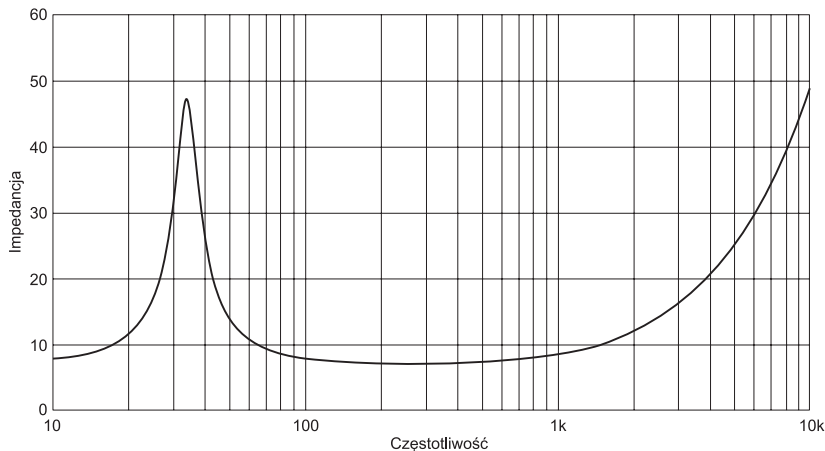
Rys. 1. Umiejscowienie zwrotnic w torze audio

łączeniu pogarszają współczynnik tłumienia rezonansów głośnika. Zwrotnica pasywna obciążona jest rzeczywistym głośnikiem, a nie jak często się przyjmuje rezystorem. Zmiana parametrów głośnika wpływa na pracę całej zwrotnicy. Nawet między głośnikami z tej samej serii występują różnice. Dlatego idealnie zestrojony filtr dla jednego z nich nie będzie idealny dla wszystkich. Podczas pracy obciążenie jakie stanowi głośnik cały czas się zmienia. Zmiany te związane są głównie z wychyleniem cewki i jej temperaturą. Dodatkowo, duża tolerancja elementów zwrotnicy nie ułatwia jej strojenia. W efekcie początkowo idealnie zestrojona zwrot-



Rys. 2. Model impedancji głośnika

Tab. 1. Podział pasma akustycznego na podpasma	
Nazwa	Zakres częstotliwości
Najniższy bas	poniżej 32 Hz
Niski bas	20...40 Hz
Średni bas	40...80 Hz
Wyższy bas	80...160 Hz
Niższe średnie tony	160...320 Hz
Średnie tony	320...2560 Hz
Wyższe średnie tony	2560...5120 Hz
Wysokie tony	5120...10240 Hz
Najwyższe tony	10240...20000 Hz



Rys. 3. Charakterystyka impedancji obliczonego modelu głośnika

nica podczas pracy cały czas będzie zmieniała swe parametry.

Kolejną wadą jest skomplikowany charakter obciążenia jakie stanowi zwrotnica wraz z zespołem głośników dla wzmacniacza. Często, aby zlinearyzować charakterystykę impedancji zespołu głośnikowego stosuje się dodatkowe obwody korekcyjne.

Dodatkową wadą zwrotnic pasywnych jest słaba ochrona głośnika wysokotonowego przed zniekształconym sygnałem, który powstaje po przesterowaniu wzmacniacza. Następuje wówczas skierowanie sygnału o dużej mocy do głośnika wysokotonowego. Może to spowodować jego uszkodzenie.

Proste wzory pomocne przy projektowaniu filtra opierają się na założeniu, iż impedancja głośnika jest czysto rezystancyjna, tzn. głośnik zachowuje się jak rezystor o wartości równej impedancji tego głośnika. W rzeczywistości impedancja głośnika jest daleka od impedancji rezystora, dlatego stosuje się dodatkowe obwody korygujące, aby obciążenie zwrotnicy było jak najbardziej rezystancyjne.

Zwrotnica najczęściej jest umieszczona w obudowie głośnika, przez co cały czas poddawana jest drganiom. Kolejnym problemem w czasie wykonywania takiej zwrotnicy są cewki. Maksymalną liniowość zapewniają cewki powietrzne, jednak charakteryzują się one dużym kosztem, gabarytami i rezystancją. Cewki z rdzeniem ferrytowym lub żelaznym zmniejszają ten problem kosztem liniowości. Cewki zwrotnicy powinny charakteryzować się dużą liniowością i małą rezystancją, dlatego powinny to być cewki powietrzne nawinię-

te bardzo grubym drutem. Koszt takich cewek jest niestety znaczny.

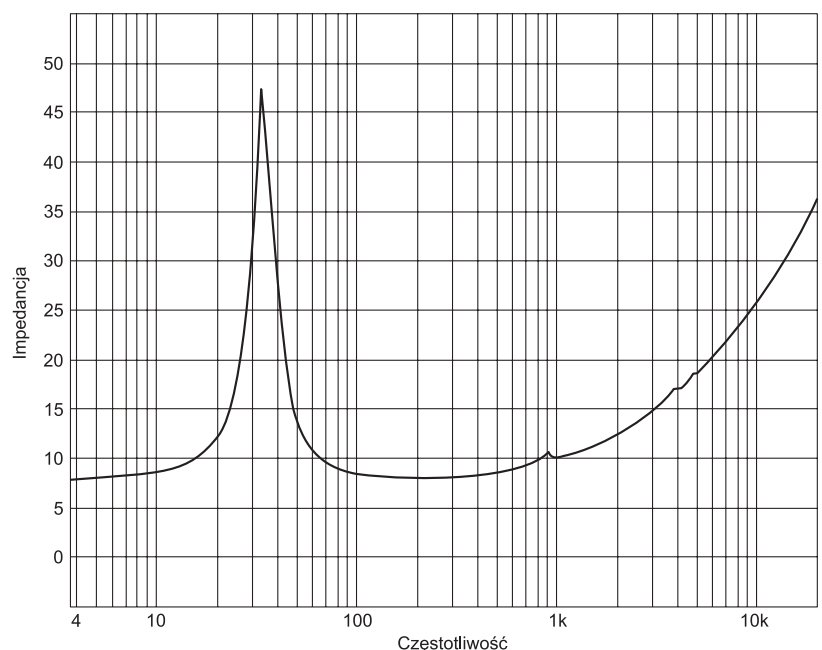
Kondensatory stosowane przy budowie takich zwrotnic muszą charakteryzować się bardzo dobrymi parametrami. Współpracując z nimi impedancje są małe, dlatego często wymaga się, aby były to kondensatory o dość dużej pojemności i małej zastępczej rezystancji szeregowej. Powoduje to, iż takie kondensatory są drogie.

Kolejny rodzaj zwrotnic przedstawiony jest na rys. 1b. Są to zwrotnice aktywne – filtry budowane z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych. Ich zaletą jest wyeliminowanie dodatkowych elementów poza przewodem głośnikowym pomiędzy wzmacniaczem, a głośnikiem. Takie połączenie charakteryzuje się mniejszą degradacją współczynnika tłumienia wzmacniacza. Obciążenie

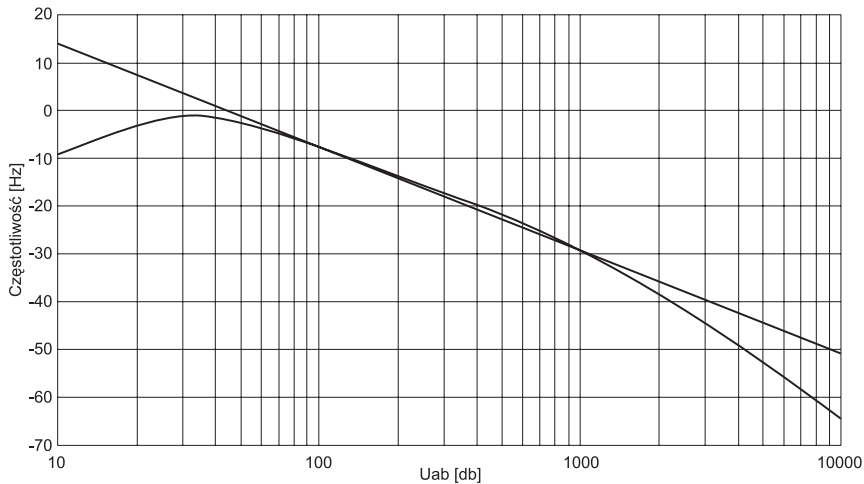
Tab. 2. Parametry głośnika 6618, Acoustics TVM

Parametr	Wartość
Fs	33,83 Hz
Re	7,26 Ω
Qms	4,97
Qes	0,83
Qts	0,71
Le	777 μ H
Vas	77 litrów
Mms	18,98 g
Cms	1166 μ m/N
Bl	5,93

wzmacniacza stanowi tylko impedancja głośnika, która jest znacznie łatwiejsza do wysterowania niż skomplikowana impedancja zespołu głośników. Poza tym wzmacniacz przetwarza tylko część sygnału audio. Powoduje to, iż zniekształcenia harmoniczne i intermodulacyjne są mniejsze. Przesterowanie sekcji basowej nie ma wpływu na inne sekcje. Sygnał jest kształtowany i dzielony na odpowiednie pasma przed wzmacniaczem mocy. Kolejną zaletą zwrotnic aktywnych jest całkowite ich odizolowanie przez wzmacniacz od wpływu impedancji głośnika. Obciążenie zwrotnicy aktywnej stanowi tylko impedancja wejściowa wzmacniacza, która jest znacznie bardziej przewidywalna i liniowa niż impedancja głośników. Zastosowanie filtrów aktywnych daje projektantowi znacznie większe możliwości przygotowania sygnału, tak aby głośniki mogły go jeszcze



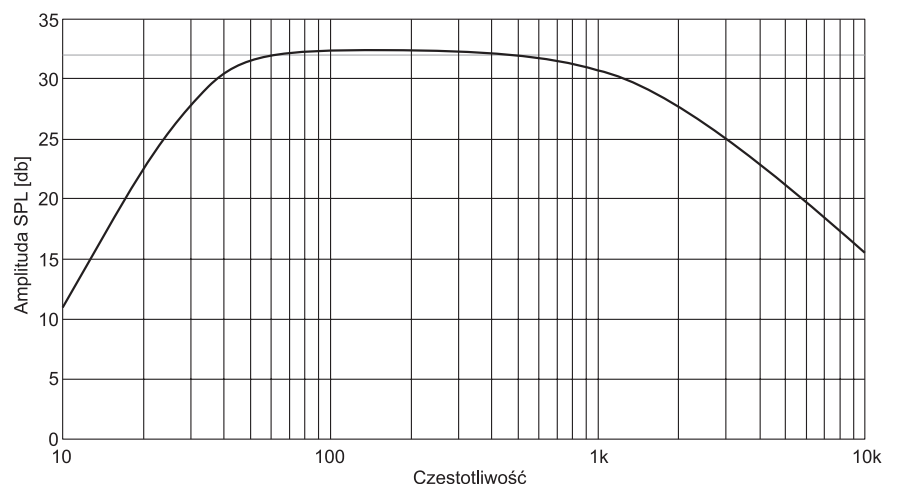
Rys. 4. Charakterystyka głośnika (z rys. 3) podawana przez producenta

Rys. 5. Charakterystyka napięcia U_{ab} (dB)

dokładniej odtworzyć. Pozwala także na łatwiejsze dostrojenie charakterystyki zespołu głośnikowego do pomieszczenia, w którym jest on użytkowany, na przykład przez umieszczenie odpowiednich regulatorów sterujących zwrotnicą. Cała moc wzmacniacza dostarczana jest tylko do głośników, energia tracona w zwrotnicy aktywnej jest bardzo mała. Ma to znaczenie przy nagłośnianiu dużych imprez. Sekcja basowa posiada osobny wzmacniacz, natomiast sekcja średnio-wysokotonowa sterowana jest z innego dedykowanego do tego wzmacniacza mocy. Pozwala to także na dobór wzmacniaczy w zależności od wymagań, na przykład wzmacniacz w klasie „D” steruje głośnikiem basowym, a wzmacniacz w klasie „A” głośnikiem wysokotonowym. Jeżeli głośniki różnią się w bardzo dużym stopniu skutecznością, to aby wyrównać ich charakterystykę przetwarzania sygnału, którym są sterowane dostarczany jest z różnym wzmocnieniem, nie powoduje to dodatkowych strat mocy. Dla porównania w zwrotnicach pasywnych w takim przypadku skuteczność zespołu była zmniejszana do najniższej skuteczności głośników, a pozostała moc tracona na dodatkowych elementach.

Bardzo dużą i często nie docenianą cechą zwrotnic aktywnych jest o wiele większy zapas mocy. Załóżmy, że sterujemy 70 W głośnikiem nisko-średniotonowym i 10 W głośnikiem wysokotonowym, oba o impedancji 8Ω . Aby wydzielić taką moc sinusoidalną, amplituda napięcia na zaciskach głośnikowych musi być równa odpowiednio 33,5 V oraz 12,5 V.

Aby uzyskać taką moc z zastosowaniem zwrotnicy pasywnej (przy założeniu, iż sama zwrotnica pracowałaby bezstratnie), musielibyśmy zastosować wzmacniacz, którego amplituda sygnału wynosiłaby 46 V. Wzmacniacz taki miałby moc ciągłą równą 130 W. W efekcie zastosowanie zwrotnicy aktywnej powoduje lepsze odtwarzanie transjentów (krótkich impulsów o dużej mocy), ponieważ wzmacniacze będą rzadziej i w mniejszym stopniu przesterowane – wzmacniacze o łącznej mocy 80 W zachowują się jak wzmacniacz co najmniej 130 W, w praktyce można przyjąć, iż dopiero wzmacniacz o mocy 160 W – czyli dwukrotnie większej – będzie równie odporny na przesterowanie. Dodatkowo efekt przesterowania jednego ze wzmacniaczy będzie znacznie mniej słyszalny, gdyż będzie zniekształcona tylko część pasma sygnału, a nie całe jak przy zwrotnicach pasywnych i jednym wzmacniaczu.

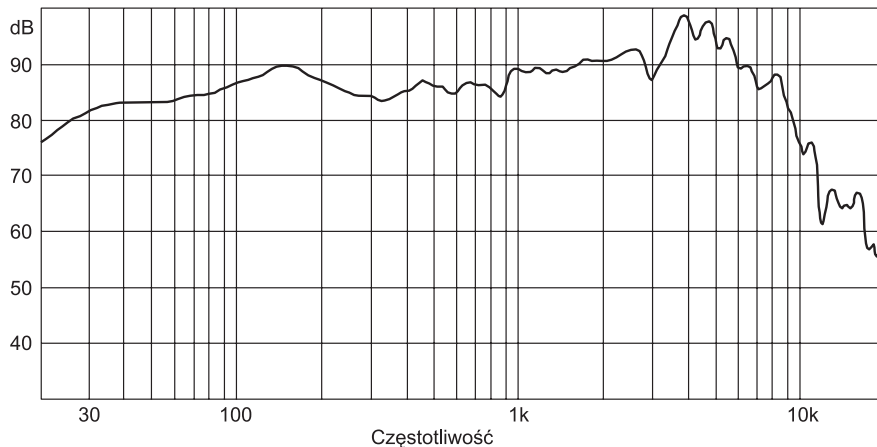


Rys. 6. Teoretyczna charakterystyka amplitudy dźwięku generowanego przez głośnik

Wadą zwrotnic aktywnych jest konieczność stosowania kilku wzmacniaczy mocy. Filtry aktywne do swego działania potrzebują także źródła zasilania, więc taki układ zazwyczaj posiada wbudowany zasilacz. W związku z tym cały zestaw audio często jest bardziej kosztowny.

Zalety zwrotnic aktywnych sprawiają, iż takie rozwiązanie często jest stosowane w monitorach studyjnych, gdzie dąży się do jak najdokładniejszej reprodukcji dźwięku. W jednym z najlepszych zespołów głośnikowych B&W Nautilus zastosowano to rozwiązanie, stereofoniczny zestaw zasilany jest z ośmiu wzmacniaczy mocy.

Trzeci rodzaj zwrotnic przedstawiony na rys. 1c to zwrotnice cyfrowe. Tak samo jak filtry aktywne jest on umieszczony przed wzmacniaczem mocy. Zalety takiego rozwiązania są takie same jak zwrotnic aktywnych. Dodatkową zaletą filtrów cyfrowych jest ich powtarzalność, łatwość szybkiego reprogramowania i rekonfigurowania. Wydawać by się mogło, iż nie są one popularne, jednak wraz z rozwojem kina domowego zawędrowały do wielu domów. Filtry te są wbudowane w wiele odtwarzaczy DVD, procesorów dźwięku i systemów surround. Różnie są one nazywane przez producentów, ale zazwyczaj pełnią podobną funkcję – sygnał niskotonowy przekierowują do subwoofera oraz korygują charakterystykę sygnału kierowanego do kanałów surround. Ich cyfrowa implementacja sprawia, iż każdy filtr z danej serii będzie posiadał dokładnie taką cha-



Rys. 7. Charakterystyka producenta odpowiadająca symulacji z rys. 6

rakterystykę jak model wzorcowy. Poprzez przeprogramowanie filtra będzie można ją zmienić lub wybrać inną, bez fizycznej ingerencji w układ. Dodatkową zaletą jest łatwość umieszczenia opóźnień w kanałach odpowiednich głośników. Ich wadą jest możliwość przetwarzania tylko i wyłącznie sygnałów cyfrowych. Jeżeli będziemy chcieli je zastosować dla sygnałów analogowych, wówczas w przetworniku analogowo-cyfrowym musi nastąpić konwersja sygnału do postaci cyfrowej. Tak jak w przypadku filtrów aktywnych konieczne jest stosowanie wielu wzmacniaczy mocy oraz dodatkowych przetworników cyfrowo-analogowych. Wraz z rozwojem i udoskonalaniem technologii możliwe będzie zastosowanie rozwiązania znanego z wzmacniacza „TacT Millenium”, o którym można powiedzieć, iż jest przetwornikiem cyfrowo-analogowym z wyjściem mocy. Dużą niedogodnością dla amatorów jest duża cena układów DSP, które odpowiednio zaprogramowane realizują funkcję zwrotnicy cyfrowej, a także trudności z ich programowaniem. Nawet dla firm profesjonalnie zajmujących się obróbką dźwięku zbudowanie optymalnie działającej zwrotnicy cyfrowej jest zadaniem trudnym i kosztownym. Być może na polskim rynku pojawią się niedrogie moduły zwrotnic cyfrowych wraz z dedykowanym oprogramowaniem, dopiero wówczas większość projektantów będzie mogła skorzystać z ich zalet.

Podsumowując, według mnie najlepszym rozwiązaniem dla amatorów jest stosowanie niezbyt skomplikowanych zwrotnic pasywnych, a do bardziej ambitnych projektów zwrotnic aktywnych. W przyszłości

cena zwrotnic cyfrowych będzie coraz niższa i dopiero wówczas mają one szansę stać się alternatywą dla zwrotnic aktywnych.

Zanim zaczniemy projektować dobrej jakości zwrotnice musimy zrozumieć, jak działa najczęściej stosowany głośnik dynamiczny oraz jakie ograniczenia wynikają z jego budowy. W torze audio jest on elementem, który najbardziej zniekształca sygnał. Głośnik charakteryzuje się określonym pasmem, które jest w stanie odtwarzać z dużą dokładnością. Projektując zwrotnicę dąży się do możliwie dokładnego odtwarzania sygnałów audio, jednocześnie każdy z głośników powinien przetwarzać sygnały, które jest w stanie najlepiej odtworzyć. Zrozumienie ograniczeń i możliwości, każdego z głośników pozwala na dokładniejsze sprecyzowanie jak zwrotnica powinna przetwarzać docierający do nich sygnał.

Zacznę od stosunkowo prostego problemu jakim jest modelowanie impedancji głośnika. W przyszłości model ten będzie potrzebny, aby móc symulować zachowanie różnych typów zwrotnic pasywnych obciążonych impedancją głośnika. Z modelu tego wynika także, jak zachowywałby się głośnik gdyby był idealny. Jako przykład posłuży głośnik firmy Acoustics TVM, model 6618, jest to niedrogi głośnik niskotonowy z membraną celulozową.

Na rys. 2 pokazano model impedancji głośnika. Korzystając z wzorów znajdujących się w ramce, możliwe jest obliczenie elementów modelu. Parametry R_e oraz L_e zostały podane przez producenta.

Parametr C_{ms} to podatność zawieszenia głośnika, opisuje on o ile

$$(1) \quad L_{CES} = C_{MS} \cdot (B \cdot l)^2$$

$$(2) \quad C_{MES} = \frac{M_{MS}}{(B \cdot l)^2}$$

$$(3) \quad R_{MES} = \frac{(B \cdot l)^2}{R_{MS}}$$

$$(4) \quad f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{MES} \cdot C_{MES}}}$$

$$(5) \quad Q_{MS} = \frac{R_{MES}}{p}$$

$$(6) \quad p = \sqrt{\frac{L_{CES}}{C_{MES}}}$$

$$(7) \quad X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

milimetrów przesunie się membrana głośnika, gdy podziałamy na nią siłą 1 Newtona. We wzorze (1) parametr podawany jest jako m/N, czyli wartość z tabeli musimy pomnożyć przez 10^{-6} . Parametr Bl jest to współczynnik siły magnetycznej w szczelinie.

Obliczamy: $L_{ces} = 1166 \cdot 10^{-6} \cdot (5,93)^2 = 1166 \cdot 10^{-6} \cdot 35,17 = 41 \cdot 10^{-3} = 41 \text{ mH}$

Parametr M_{ms} to masa ruchoma, tzn. masa cewki i membrany głośnika. Do wzoru (2) powinna być ona podana w kilogramach.

Obliczamy $C_{mes} = 18,98 \cdot 10^{-3} / (5,93)^2 = 18,98 \cdot 10^{-3} / 35,17 = 539 \cdot 10^{-6} = 539 \text{ } \mu\text{F}$

Mając obliczone wartości elementów L_{ces} i C_{mes} warto sprawdzić czy nie popełniliśmy błędu, najłatwiej obliczając częstotliwość rezonansową ze wzoru (4). Wynosi ona $f_r = 33,85 \text{ Hz}$, producent podaje częstotliwość rezonansową $f_s = 33,83 \text{ Hz}$. Jak widać parametry zastępcze L_{ces} i C_{mes} tworzą obwód rezonansowy, którego częstotliwość rezonansowa jest taka sama jak częstotliwość rezonansowa głośnika.

Niestety producent nie podał parametru R_{ms} , więc nie możemy skorzystać ze wzoru (3). Parametr R_{mes} można łatwo obliczyć znając impedancję głośnika dla częstotliwości rezonansowej. Wystarczy odjąć od wartości tej impedancji re-

zystancję cewki głośnika $R_{me} = Z_{max} - R_e$

Z charakterystyki impedancji podanej przez producenta, która znajduje się na rys. 4 odczytujemy, iż impedancja dla częstotliwości rezonansowej wynosi $Z_{max} = 47 \Omega$.

Obliczamy: $R_{me} = 47 - 7,26 = 39,74 \Omega$

Jako sprawdzenie wyniku wykorzystamy metodę opierającą się na obliczeniu dobroci mechanicznej głośnika zgodnie ze wzorem (5).

Z wzoru (6) na podstawie wcześniej obliczonych parametrów L_{cs} i C_{ms} obliczamy $p = 8,72$. Po przekształceniu wzoru (5) otrzymujemy $R_{ms} = Q_{ms} * p = 4,97 * 8,72 = 43,35 \Omega$. Można zauważyć, iż istnieje pewna rozbieżność pomiędzy wynikami obliczeń, jednak w praktyce nie ma ona znaczenia. Obliczenia z wykorzystaniem Q_{ms} uznalibyśmy za dokładniejsze.

Na rys. 3 pokazano charakterystykę impedancji obliczonego modelu. Porównując ją z charakterystyką przedstawioną przez producenta (rys. 4) można zauważyć, iż do częstotliwości około 1 kHz charakterystyki te są bardzo zbliżone. Powyżej tej częstotliwości model okazuje się zbyt uproszczony i różnice stają się coraz większe.

Przedstawiony model ma dość cenną właściwość – napięcie pomiędzy punktami A i B jest proporcjonalne do wychylenia cewki głośnika. Na rys. 5 przedstawiono charakterystykę częstotliwościową napięcia U_{ab} wyrażonego w decybelach.

Jak można zauważyć wychylenie cewki głośnika rośnie do jego częstotliwości rezonansowej po czym opada ze stałą prędkością 6 dB/oktawę. Dla łatwiejszego zrozumienia, na rysunku zaznaczono linię o spadku 6 dB/oktawę. Skoro charakterystyka ta nie jest płaska, to w jaki sposób sygnał akustyczny generowany przez głośnik charakteryzuje się pewnym pasmem, w którym jego amplituda jest prawie płaska? Otóż, aby głośnik taką samą głośnością odtwarzał częstotliwość dwa razy większą, jego cewka drga z amplitudą o połowę mniejszą. Na przykład jeżeli głośnik odtwarza częstotliwość 100 Hz i jego membrana drga z amplitudą 1mm, to aby tak samo głośno odtworzyć częstotliwość 200 Hz wystarczy, że amplituda drgań mem-

brany będzie wynosić 0,5 mm. Dla częstotliwości 400 Hz, amplituda drgań wynosi 0,25 mm. Wraz z podwojeniem częstotliwości amplituda drgań spada o połowę.

Mnożąc napięcie U_{ab} przez częstotliwość otrzymujemy charakterystykę głośnika, którego membrana spełnia założenie idealnego tłoka, czyli w pewnym uproszczeniu membrana ma idealną sztywność i brak jakichkolwiek rezonansów. Charakterystykę proporcjonalną do amplitudy dźwięku generowanego przez głośnik przedstawiono na rys. 6. Charakterystyka takiego głośnika jest prawie płaska od częstotliwości rezonansowej do częstotliwości około 1 kHz. Przekształcając wzór (7) możemy obliczyć częstotliwość, od której impedancja cewki L_e będzie większa od rezystancji R_e . Częstotliwość ta wynosi 1487 Hz. Jak można odczytać z charakterystyki jest to górna częstotliwość graniczna idealnego głośnika.

Analizując wykres z rys. 6 powinniśmy zapamiętać, iż poniżej dolnej częstotliwości granicznej amplituda dźwięku spada z prędkością 12 dB/oktawę, natomiast powyżej górnej częstotliwości granicznej z prędkością 6 dB/oktawę.

Na rys. 7 przedstawiono charakterystykę głośnika zmierzoną przez producenta. Odbiega ona znacznie od zasymulowanej charakterystyki z rys. 6. Różnice wynikają przede wszystkim ze tego, iż membrana tego głośnika nie spełnia założeń idealnego tłoka. Można zauważyć wiele rezonansów oraz ciekawą właściwość. Otóż powyżej częstotliwości 1 kHz amplituda sygnału generowanego przez głośnik nie zmniejsza się jak można oczekiwać, ale staje się ona jeszcze większa.

Zjawisko to, jak i wiele innych opiszę w kolejnym artykule.

Roman Łyczko
lyczko_roman@poczta.ox.pl

Autor jest studentem wydziału Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Śląskiej w Gliwicach oraz prezesem Koła Naukowego Elektroników.

Bibliografia:

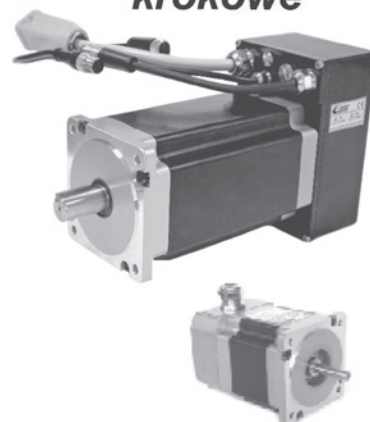
*<http://sound.westhost.com/>
http://www.epanorama.net/documents/audio/speaker_impedance.html
<http://www.tvn-valmez.cz/>*

Ever
ELETTRONICA



inteligetne sterowanie

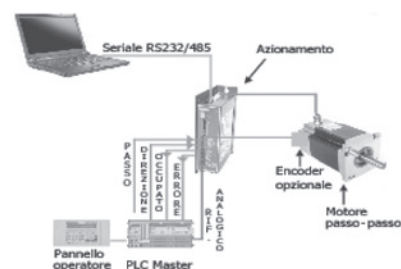
**silniki
krokowe**



**sterowniki
mikroprocesorowe**



**aplikacje
specjalizowane**



UNITEX SA

wyłączny przedstawiciel na Polskę
ul. Czerniakowska 58,
00-717 Warszawa
tel. 022 851 97 61, 0605 299 857
fax. 022 840 20 06
<http://www.unitexsa.pl>
transpol@transpol.com.pl