

Projektowanie zwrotnic głośnikowych, część 2

Przełamywanie się membrany – „cone break-up”

Membrana głośnika zachowuje się jak tłok, który zwiększając i zmniejszając ciśnienie powietrza tworzy fale dźwiękowe. Zakres pracy membrany głośnika, w którym cała membrana zachowuje się jak sztywne tłok często nazywa się zakresem tłokowym pracy głośnika. W trakcie pracy w tym zakresie każda część fali tworzonej przez membranę ma taką samą fazę. Gdy membrana przestaje być sztywna, następuje jej „przełamywanie” (*cone break-up*) oznacza to, że część membrany przesuwa się w jednym kierunku podczas, gdy jej inna część w przeciwnym. Od częstotliwości „przełamania” membrana przestaje wiernie odtwarzać ruch cewki. Także obciążenie cewki przez membranę staje się inne: zmienia się masa drgająca oraz podatność zawieszenia widziane od strony cewki głośnika. Prosty model głośnika nie symuluje tych zjawisk i staje się bardzo niedokładny. W praktyce dokładna symulacja tych zjawisk jest bardzo trudna, a konstruktywne wnioski z niej mogą być użyteczne tylko dla projektantów głośników. Konstruktorzy zespołów głośnikowych muszą pamiętać o jednym: Powyżej częstotliwości „przełamania” membrany przestaje on pracować jako całość i ruch

W drugiej części kursu o projektowaniu zwrotnic zajmiemy się niekorzystnymi zjawiskami, jakie zachodzą podczas odtwarzania dźwięków w głośnikach. Zjawiska te mają dość silny związek z budową mechaniczną i rodzajem materiału, z jakiego wykonana jest membrana. Omawiane efekty nie są najczęściej w ogóle uwzględniane podczas amatorskiego projektowania zestawów głośnikowych.

cewki głośnika nie jest wiernie zamieniany na fale akustyczne. Zniekształcenia te nie są harmonicznymi sygnału, który jest odtwarzany. Słyszalne są jako pogorszenie dynamiki i stosunku sygnał–szum.

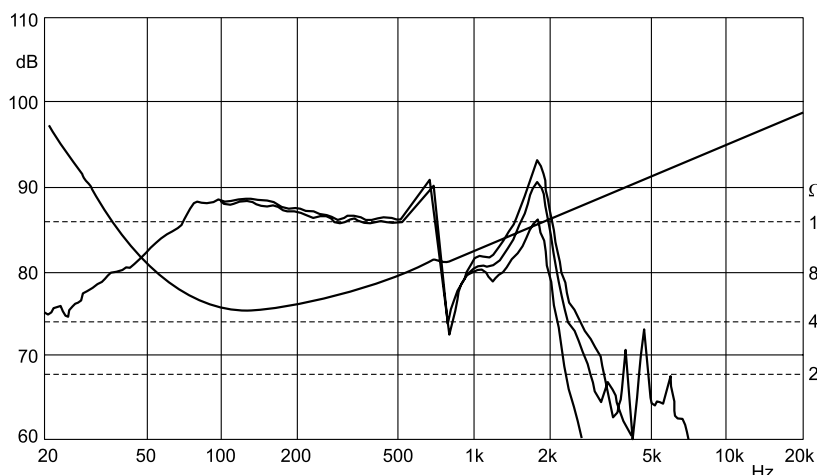
Aby sobie wyobrazić to zjawisko proponuję pewien przykład z życia codziennego. Gdy zapcha się nam umywalka, sięgamy po przepychacz. Jego gumowa część przypomina membranę głośnika, podczas korzystania z przepychacza jego membrana odkształca się tworząc okręgi, które tak samo się poruszają. Zjawisko to ilustruje w jaki sposób może odkształcać się membrana głośnika.

Powyżej częstotliwości pracy tłokowej membrana głośnika zaczyna coraz bardziej zniekształcać sygnał. W jaki sposób to się dzieje i jak brzmią takie zniekształcenia zależne jest od materiału, z którego wykonana jest membrana, jej geometrii i wielu czynników, których nie jesteśmy w stanie przewidzieć. Jeżeli ma-

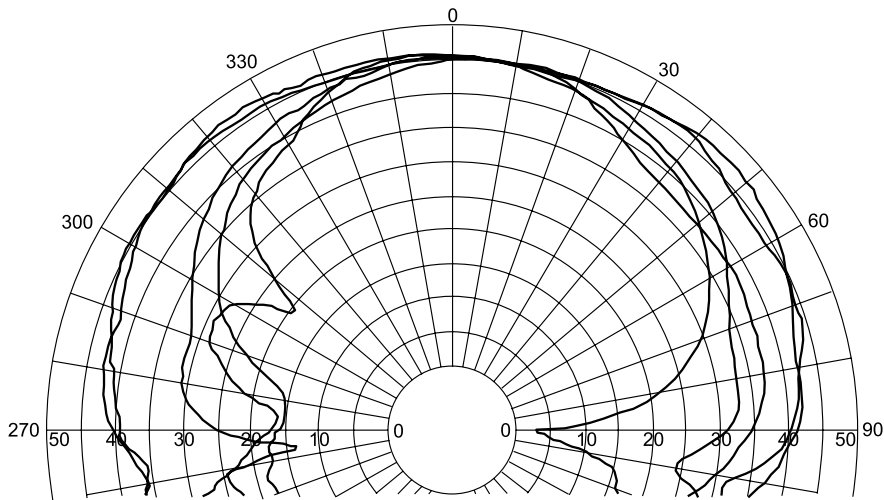
teriał membrany jest elastyczny jak celuloza, polipropylen czy tekstylne kopułki, to częstotliwość jego przełamywania jest niższa, ale zniekształcenia są mocniej tłumione. Natomiast jeżeli materiał membrany jest sztywny jak aluminium, beryl czy diamentowe kopułki, to częstotliwość przełamywania będzie wyższa, ale zniekształcenia powyżej tej częstotliwości będą znacznie większe.

Najprościej ujmując powinno się unikać odtwarzania przez głośnik sygnałów, których nie jest on w stanie wiernie odtworzyć szczególnie, gdy głośnik charakteryzuje się sztywną membraną.

Na **rys. 8** znajduje się charakterystyka amplitudowa głośnika firmy Peerless model 830452. Jest to duży (26 cm) głośnik niskotonowy. Jak widać na charakterystyce, dla częstotliwości 650 Hz występuje rezonans, przy 800 Hz następuje głęboki spadek skuteczności, następnie dla 1 kHz i 1,8 kHz występują rezonanse. Porównując kształt tej charakterystyki z kształtem modelu głośnika idealnego można zauważyć, iż do częstotliwości 500 Hz kształt charakterystyki odpowiada kształtowi charakterystyki modelu głośnika idealnego. Jak można wyczytać w materiałach producenta, membrana tego głośnika charakteryzuje się bardzo dużą sztywnością. Na charakterystyce wyraźnie widać, iż nie powinien od pracować z sygnałami powyżej 500 Hz. Powyżej tej częstotliwości kończy się pasmo jego pracy tłokowej – membrana traci sztywność. Na charakterystyce amplitudowej zaznaczonej również na rys. 8 możemy zauważyć nierówność przy częstotliwości 650 Hz.



Rys. 8. Charakterystyka amplitudowa głośnika firmy Peerless model 830452 (poszczególne krzywe uwzględniają kierunkowość głośnika)



Rys. 9. Charakterystyka kierunkowa głośnika T2010 (Beyma)

Patrząc na model impedancji głośnika można zauważyć, iż taka nierówność może być spowodowana przez zmianę wartości elementu C_{mes} lub L_{mes} , które wynikają z parametrów mechanicznych głośnika. Jeżeli na charakterystyce amplitudowej i impedancyjnej dla tej samej częstotliwości występuje nierówność, to na 99% spowodowana jest ona utratą przez membranę głośnika sztywności. Pamiętajmy, iż jest to głośnik niskotonowy, zaprojektowany do stosowania w subwooferach, czyli dla sygnałów do około 150 Hz.

Stosując powyższy wniosek do głośnika ARN-6618, na charakterystykach zamieszczonych w poprzednim artykule możemy zauważyć podobną sytuację dla częstotliwości 900 Hz. Jak wcześniej napisałem, głośnik ten od częstotliwości około 1 kHz przestaje zachowywać się zgodnie z modelem. Przypominam, iż głośnik ten posiada elastyczną membranę celulozową.

Kierunkowość głośnika

Kolejnym problemem, który ogranicza w pewien sposób górną częstotliwość graniczną głośnika jest jego kierunkowość. Przyjmuje się, iż częstotliwości sygnałów audio zawierają się w zakresie 20...20000 Hz. Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi około 343 m/s. Możemy obliczyć długości fal akustycznych odpowiadające tym częstotliwościom:

$$l = v/f$$

l – długość fali w metrach,

v – prędkość dźwięku (około 343 m/s),

f – częstotliwość dźwięku w Hz.

Fala o częstotliwości 20 Hz ma długość około 17 m, podczas gdy długość fali o częstotliwości 20000 Hz wynosi 17 mm. To bardzo duży zakres. Rozprzestrzenianie się fal o długości 17 m przebiega w sposób wszechkierunkowy. Praktycznie każda przeszkoda, na którą taka fala może natrafić w pokoju odsłuchowym będzie od niej znacznie mniejsza. Fala po prostu ją „ominie”. Także średnica membrany głośnika będzie o wiele mniejsza od tej fali i jej generowanie także będzie wszechkierunkowe.

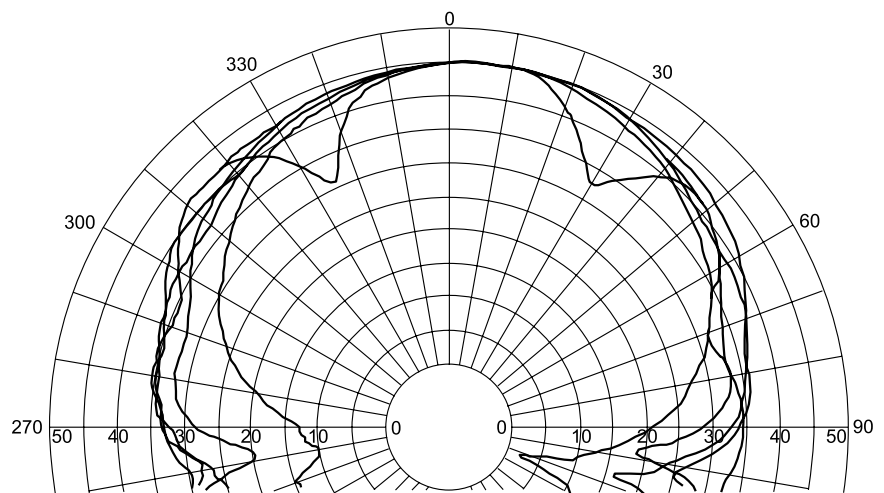
Fale o wyższych częstotliwościach (w praktyce od częstotliwości 1 kHz) zachowują się inaczej. Załóżmy, że odtwarzamy falę o częstotliwości 10 kHz ($l=34$ mm) z wykorzystaniem głośnika o średnicy 10 cm. Średnica głośnika jest prawie trzy razy większa od długości fali. Membrana generuje taką falę w sposób bardzo kierunkowy.

Oznacza to, iż im bardziej odsuniemy się od osi głośnika tym fala ta będzie miała mniejszą amplitudę. Poszczególne części membrany znajdują się w różnej odległości od naszego ucha. Te niewielkie różnice, są porównywalne z długością fali 34 mm (sygnał o częstotliwości 10 kHz). Między innymi dlatego większość membran głośników wysokotonowych ma kształt kopułki. Jeżeli popatrzymy z boku na taki głośnik, to zobaczymy połowę jej powierzchni.

Propagację krótkich fal akustycznych można porównać do światła latarki. Strumień świetlny bezpośrednio oświetla tylko obszar, w którego stronę kierujemy latarkę. Światło w pozostałych miejscach to światło odbite. Tak zachowuje się membrana dużego głośnika. Jeżeli natomiast zamiast latarki użyjemy samej żarówki, to oświetlimy całe pomieszczenie. Kształt żarówki jest podobny do kształtu kopułki głośnika wysokotonowego.

Głośnik emituje falę akustyczną kierunkowo, gdy długość fali akustycznej jest zbliżona lub mniejsza od średnicy membrany. Załóżmy, że mamy głośnik o średnicy 20 cm, a średnica jego membrany wynosi 17 cm. Obliczamy: $343/0,17=2017,6$ Hz. Od częstotliwości około 2 kHz głośnik ten będzie coraz bardziej kierunkowy.

Na rys. 9 i 10 znajdują się charakterystyki kierunkowe dwóch głośników wysokotonowych firmy Beyma, modele (odpowiednio): T2010 i T2030. Każda linia na tych charakterystykach odpowiada jednej częstotliwości. Amplituda na osi głośnika jest amplitudą odniesienia.



Rys. 10. Charakterystyka kierunkowa głośnika T2030 (Beyma)

Teraz przesuwając się w lewo lub prawo możemy zauważyć, iż linie zbliżają się do środka wykresu – amplituda odpowiadająca danej częstotliwości maleje. Na rys. 9 widać, iż dla kąta 30° różnice w amplitudach wynoszą około 6 dB. Wraz z oddalaniem się od osi głośnika różnice te stają się coraz większe – dla kąta 60° wynoszą już ponad 10 dB. Z rys. 10 wynika, że drugi głośnik promieniuje bardziej równomiernie, co jest najprawdopodobniej spowodowane zastosowaniem stożka korygującego. Możemy także zauważyć, iż jedna z linii ma kształt odbiegający od pozostałych. Spadek skuteczności dla 30 i 330° jest spowodowany kierunkowością głośnika i rezonansami związanymi z jego stożkiem korekcyjnym. Niestety na charakterystyce producent nie zaznaczył jakiej częstotliwości efekt ten dotyczy.

Charakterystyka kierunkowości głośnika może być zaznaczona także w inny sposób – poprzez szereg charakterystyk amplitudowych zaznaczonych na jednym wykresie. Każda charakterystyka odpowiada pewnemu odchyleniu od osi głośnika. W ten sposób zaznaczona jest kierunkowość głośnika na rys. 8.

Charakterystyki kierunkowe można oczywiście symulować, niestety proste programy do symulacji pracy głośnika nie opierające się na parametrach geometrycznych membrany nie są w stanie wykonać takich obliczeń i charakterystyk.

Modulacja strumienia magnetycznego

Modulacja strumienia magnetycznego polega na zmienianiu się współczynnika B_l głośnika. Modulacja ta występuje najczęściej przy sygnałach o większych częstotliwościach. Gdy przez cewkę głośnika płynie prąd, indukuje się w niej strumień magnetyczny, który przeciwdziała strumieniowi magnetycznemu magnesu głośnika. Aby zmniejszyć tę modulację stosuje się magnesy neodymowe, których strumień jest bardziej stabilny niż magnesów ferrytowych lub pierścienie miedziane, które pracują jak zwarte cewki stabilizując strumień magnetyczny. Zjawisko to jest dość istotne, jednak w materiałach producentów rzadko jest ono opisywane. Sprzęt pomiarowy będący w stanie pomóc przy jego analizie jest

bardzo kosztowny. Cena wykracza często powyżej możliwości finansowych małych przedsiębiorstw.

Podsumowując, górną częstotliwość pracy głośnika głównie ograniczają trzy czynniki:

- 1 Zachowanie się głośnika jako filtru pasmowoprzepustowego.
- 2 Utrata przez membranę głośnika sztywności.
- 3 Zwiększanie się kierunkowości głośnika.

Ograniczenie wychylenia membrany X_{\max}

W poprzednim artykule napisałem, iż jednym z ograniczeń dolnej granicy częstotliwości jaką głośnik może efektywnie przetwarzać, jest jego częstotliwość rezonansowa. Jest to parametr, który nie zależy od amplitudy sygnału. Niezależne od tego, czy głośnik będzie grał bardzo cicho, czy bardzo głośno, jego częstotliwość rezonansowa będzie miała taki sam wpływ na jego pracę. Drugim istotnym ograniczeniem dolnej częstotliwości pracy głośnika jest maksymalne liniowe wychylenie membrany. Założmy, że mamy potężny wzmacniacz i podłączony do niego dwudrożny zestaw głośnikowy. Jeżeli słuchamy swojej ulubionej muzyki ze średnią głośnością, dźwięk jest czysty, głos wokalistki jest zrozumiały. Zaczynamy zwiększać głośność, słyszymy coraz większe zniekształcenia, w końcu głos wokalistki staje się prawie nie zrozumiały. Niekoniecznie musi to wynikać z przesterowania wzmacniacza. Głośnik też można przesterować.

Aby utrzymać takie samo natężenie dźwięku, wraz ze zwiększaniem się jego częstotliwości maleje amplituda wychyleń membrany. Stąd prosty wniosek: im bardziej będziemy zwiększać częstotliwość sygnału, tym głośniej lub z mniejszymi zniekształceniami sygnał ten będzie odtwarzany.

Wiele nawet dość prostych programów do symulacji jest w stanie dokładnie zasymulować ten efekt i obliczyć do jakiej częstotliwości ograniczeniem jest maksymalne wychylenie membrany X_{\max} . Powyżej tej częstotliwości ograniczeniem jest moc głośnika.

Wymagane wychylenie membrany zależne jest także od zastosowanej obudowy. Obudowy *bass-reflex* czy *band-pass* stawiają inne wymagania względem amplitudy drgań membrany niż obudowa zamknięta.

Moc tracona w cewce głośnika

Oprócz ograniczenia wychylenia membrany, w głośnikach wysokotonowych bardzo istotnym ograniczeniem jest moc tracona w cewce głośnika. Powyżej częstotliwości 350 Hz średnia moc materiału muzycznego spada wraz ze wzrostem częstotliwości. Producenci głośników wysokotonowych wykorzystują to zjawisko. Często możemy się spotkać z twierdzeniem, iż moc nominalna głośnika wysokotonowego wynosi 100 W. W praktyce moc tego głośnika może wynosić maksymalnie około 10 W. Podane 100 W dotyczy mocy całego zespołu głośnikowego, w którym może być on zastosowany. Czasem w materiałach producenta podane jest z jaką zwrotnicą głośnik ten powinien pracować. Firma Beyma zaleca, aby głośniki T2010 oraz T2030 pracowały z filtrem górnoprzepustowym o częstotliwości granicznej 2 kHz i nachyleniu 12 dB/oktawę. Jeżeli chcielibyśmy zmniejszyć częstotliwość graniczną, powinniśmy zwiększyć stromość filtru. Jeżeli natomiast chcielibyśmy zastosować proste filtry 1-go rzędu o nachyleniu 6 dB/oktawę, to powinniśmy zwiększyć częstotliwość graniczną. Moc dostarczana do głośnika powinna być zbliżona do mocy, przy której głośnik pracuje z filtrem proponowanym przez producenta.

Podsumowując, dolną częstotliwość pracy głośnika ograniczają:

- 1 Zachowanie się głośnika jako filtru pasmowoprzepustowego – jego częstotliwość rezonansowa.
- 2 X_{\max} – maksymalne liniowe wychylenie cewki.
- 3 Moc tracona w cewce głośnika – problem ten dotyczy głównie głośników średnio- i wysokotonowych.

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://www.cosmos2000.org/audio/lspeaker.htm>
<http://ldsg.snippets.org/motors.php3>
<http://professional.beyma.com>