

Niezbędnik dla amatorów i profesjonalistów

W głośnikowym żywiole, część 5

Obudowy zamknięte - ćwiczenia, część 1

Miesiąc temu pokazaliśmy, jak znając elementarne parametry Thiele'a-Small'a (f_s , Q_{ts} , V_{as}), za pomocą kilku prostych wzorów ustalać dobroć całkowitą Q_{tc} i częstotliwość rezonansową f_c głośnika w obudowie o określonej objętości, co oczywiście w drugą stronę pozwala obliczać objętość potrzebną dla zrealizowania założonej wartości f_c czy Q_{tc} . Znając Q_{tc} i f_c możemy z kolei ustalić kształt charakterystyki przetwarzania, a na tej podstawie znaleźć również spadki - standardowo określa się 3- lub 6-decybelowe jako częstotliwości graniczne pasma przenoszenia, choć jest to kwestia czysto umowna. Częstotliwości spadków można też obliczać na podstawie innych, bardziej skomplikowanych wzorów, których nie podawaliśmy. Jeszcze trudniejsze do wyznaczenia za pomocą „ręcznych” rachunków są charakterystyki wytrzymałości (mocy), maksymalnego ciśnienia akustycznego czy charakterystyka impedancji. Dlatego w poniższych przykładach posłużymy się symulacjami programu Boxcalc.

W całym „teście” wystąpi dziesięć głośników o różnych średnicach (od 14-cm do 30-cm) i różnych zestawach parametrów T-S. W większości będą to przykłady głośników doskonale nadających się do obudowy zamkniętej, ale w kilku przypadkach będziemy rozważać sytuacje nietypowe. W naszej kolekcji jest więc sześć głośników firmy Peerless (14, 17, 21, 26 i dwa 31-cm), trzy 18-cm głośniki firmy Scan-Speak i jeden 18-cm firmy Vifa. Wymienieni duńscy producenci głośników są doskonale znani konstruktorom na całym świecie, a ich produkty stały się dostępne również w Polsce. Wybraliśmy głośniki różnych pułapów cenowych i do różnych układów (nisko-średniotonowe, niskotonowe, subwooferowe).

Peerlessy

Na początek dwa nisko-średniotonowe Peerlessy - 14-cm z serii CSC i 17-cm z serii CSX. Dobre głośniki za umiarkowaną cenę - stąd też bardzo popularne, tym bardziej że uniwersalne i łatwe do aplikacji. Ich membrany z wielowarstwowego polipropylenowego „sandwicha” mają zarówno dobrą sztywność, jak i wysokie tłumienie drgań wewnętrznych, a przez to charakterystyki przetwarzania biegają gładko, nie wymagając stosowania skomplikowanych filtrów.

Podana moc została, wedle deklaracji producenta, ustalona według normy IEC jako długotrwała moc maksymalna, ale nawet nie wnikając w szczegóły tej normy, wiadomo, że odnosi się ona do maksymalnej obciążalności termicznej, a nie amplitudowej. Zależność między dostarczoną mocą a amplitudą (maksymalna amplituda liniowa jest określona przez parametr X_{lin}) zależy bowiem od rodzaju obudowy, o czym już wcześniej wspominaliśmy.

W poprzednim numerze EP przedstawiliśmy podstawowe wzory służące do obliczania obudowy zamkniętej. W najbliższych trzech odcinkach weźmiemy na warsztat dziesięć głośników, aby wzory te zastosować w praktyce, chociaż... przede wszystkim po to, aby pokazać różne możliwości głośników o odmiennych parametrach, a także aby zaobserwować zmiany charakterystyk opisujących działanie głośników w obudowach o różnych objętościach, przy różnym wytlumieniu, a także przy różnych wartościach dołączonej do głośnika rezystancji szeregowej.

Patrząc na trzy podstawowe parametry Thiele'a-Small'a (f_s , Q_{ts} i V_{as}), widzimy, że z powodu wysokiego współczynnika EBP (stosunek f_s do Q_{ts}), wyższego niż 100, zgodnie z sugestiami z zeszłego miesiąca, głośnik ten wydaje się wcale nie być stworzony do obudowy zamkniętej, która nie pozwoli przecież osiągnąć niskiej częstotliwości granicznej. Ale gdybyśmy podeszli do tego głośnika konsekwentnie i pryncypialnie, jest on nie najlepszym wyborem również do obudowy bass-reflex - ze względu na (zbyt) wysoką dobroć Q_{ts} , która nie pozwoli z kolei (w bass-refleksie), uzyskać najlepszych charakterystyk impulsowych.

Tymczasem głośnik ten jest z powodzeniem stosowany zarówno w obudowach zamkniętych, jak i z otworem. Trzeba bowiem wobec niego zastosować taryfę ulgową z powodu jego umiarkowanej wielkości. Otóż dla głośnika o średnicy 14 cm częstotliwość rezonansowa f_s w okolicach 50 Hz jest całkiem dobrym wynikiem, i to ona determinuje wysoki współczynnik EBP, nawet przy dość wysokiej dobroci Q_{ts} . Jeszcze wyższy Q_{ts} pozwoliłby obniżyć EBP i rozszerzyć pasmo, ale pogorszyłby zdolności impulsowe dla obudowy bass-reflex, a mniejsza wartość Q_{ts} - odwrotnie. Na tle innych głośników tej wielkości można stwierdzić, że CSC-145 jest głośnikiem elastycznym - właściwym zarówno do obudów zamkniętych, jak i bass-refleksów.

Obliczając parametry obudowy zamkniętej dla CSC-145, najpierw zastosujemy nasze wzory. Założymy, że chcemy osiągnąć dobroć Q_{tc} na „klasycznym” poziomie 0,71.

Na podstawie wzoru [9]:

$$Q_{tc} = Q_{ts} \cdot \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b}} + 1$$

ustalamy, że bez uwzględnienia rezystancji szeregowej, i bez wytlumienia obudowy, stanie się to w objętości 7 litrów.

$$0,44 \cdot \sqrt{\frac{11 \text{ dm}^3}{7 \text{ dm}^3}} + 1 = 0,71$$

W objętości tej częstotliwość rezonansowa f_c , obliczona na podstawie wzoru [8]:

$$f_c = f_s \cdot \sqrt{\frac{V_{as}}{V_{ab}}} + 1$$

wyniesie:

$$52 \text{ Hz} \cdot \sqrt{\frac{11 \text{ dm}^3}{7 \text{ dm}^3}} + 1 = 83 \text{ Hz}$$

I na tym nasze obliczenia, przy uproszczonej metodzie działania, w zasadzie by się kończyły. Korzystając z pod-



Rodzina głośników CSC - na zdjęciu modele 11-, 14- i 17-cm. W naszym przykładzie użyliśmy głośnika 14-cm, czyli CSC-145

14-centymetrowy CSC-145 (P850104) ma następujące parametry:

F_s [Hz]	52
Q_{es}	0,54
Q_{ms}	2,28
Q_{ts}	0,44
V_{as} [dm ³]	11
R_e [Ω]	6,1
S_d [cm ²]	91
X_{lin} [cm]	0,7
Moc [W]	60

powiedzi, że typowa rezystancja szerego-
wa podnosi dobroć w podobnym stopniu,
w jakim średnio intensywne wytłumienie
ją zmniejsza, idziemy „na skróty“ i oczekujemy, że w praktyce parametry zrealizowanej obudowy, już z udziałem tych czynników, będą podobne do oszacowanych.

Ale w drugim podejściu do tych obliczeń bądźmy dokładniejsi. Załóżmy, że znana jest

nam dołączona z zewnątrz rezystancja szerego-
wa R_g , i wynosi ona $0,5 \Omega$ (wartość prawdo-
podobna dla małej cewki prostego filtra 1. lub
2. rzędu dla głośnika nisko-średniotonowego).

Skorygowana wartość dobroci elektrycznej zostaje wyznaczona ze wzoru:

$$Q_{es'} = Q_{es} \cdot \frac{R_g + R_c}{R_e}$$

a następnie skorygowana wartość dobroci całkowitej ze wzoru:

$$Q_{ts'} = Q_{es'} \cdot \frac{Q_{ms}}{Q_{es'}} + Q_{ms}$$

Q_{ts} zwiększyło swoją wartość z 0,44 do 0,46 i w takiej sytuacji dla uzyskania Q_{tc} o wartości 0,71 potrzebujemy objętości 8 litrów (wyznaczone ponownie na podstawie wzoru [9]).

Jednocześnie w takiej objętości, częstotliwość rezonansowa Q_{tc} wyniesie 80 Hz (na podstawie wzoru [8]).

Teraz, wprowadzając do obudowy umiarkowane wytłumienie, skorygujemy objętość obudowy na podstawie wzoru [11]:

$$V_b = \frac{V_{ab}}{1,2}$$

Wyniesie ona więc ok. $6,7 \text{ dm}^3$.

Porównując do wyników obliczeń „na skróty“ widzimy, że różnice w wynikach są niewielkie - 7 dm^3 vs $6,7 \text{ dm}^3$, co odbiłoby się na minimalnie niższej wartości Q_{tc} w objętości 7 dm^3 , o ile oczywiście założone wartości R_g i wytłumienie byłyby takie same.

Teraz wprowadźmy na arenę symulacje komputerowe programem Boxcalc. Pozwala on zadeklarować nie tylko skuteczność wytłumienia, ale i współczynnik strat w obudowie, wyrażony poprzez dobroć Q_a , która jak się okazuje, ma duży wpływ na wartość Q_{tc} , dość silnie ją zmniejszając w przypadku dużych strat (czyli niskiej wartości Q_a). Oto w pierwszej symulacji założyliśmy średni poziom strat ($Q_a=10$) i lekkie wytłumienie ($\gamma = 1,1$).

Wtedy już w mniejszej niż według wcześniejszych wyliczeń objętości 6 dm^3 uzyskujemy $Q_{tc}=0,71$ - częściowo bowiem rolę „moderatora“ dobroci Q_{tc} przejęły straty w obudowie. Częstotliwość rezonansowa wyniosła 85 Hz, a więc jest nieco wyższa niż wcześniej, bowiem obudowa jest mniejsza (a straty nie wpływają na częstotliwość rezonansową).

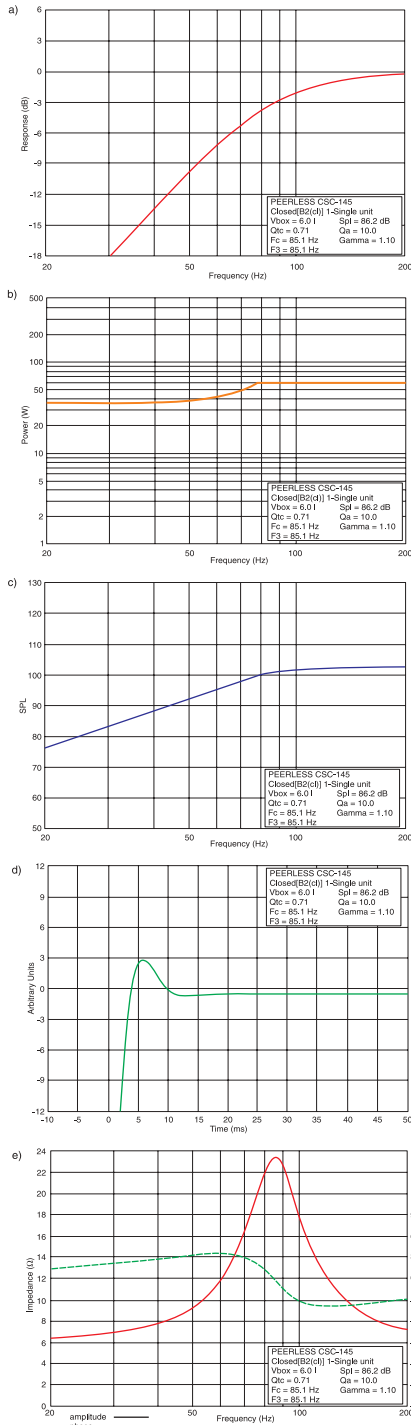
Gdybyśmy zaprogramowali jeszcze wyższe straty (np. $Q_a=5$), i mocniejsze wytłumienie (np. $\gamma=1,2$), to dla ustalenia $Q_{tc}=0,71$ wystarczyłaby obudowa o objętości tylko 4,3 litra. Jak widać, w stosunku do obudowy zupełnie niewytłumionej i bezstratnej, oznacza to zmniejszenie objętości o prawie połowę!

W praktyce straty na poziomie $Q_a=5$ występują w dużych obudowach, a małe charakteryzują się wyższym współczynnikiem Q_a (czyli mniejszymi stratami).

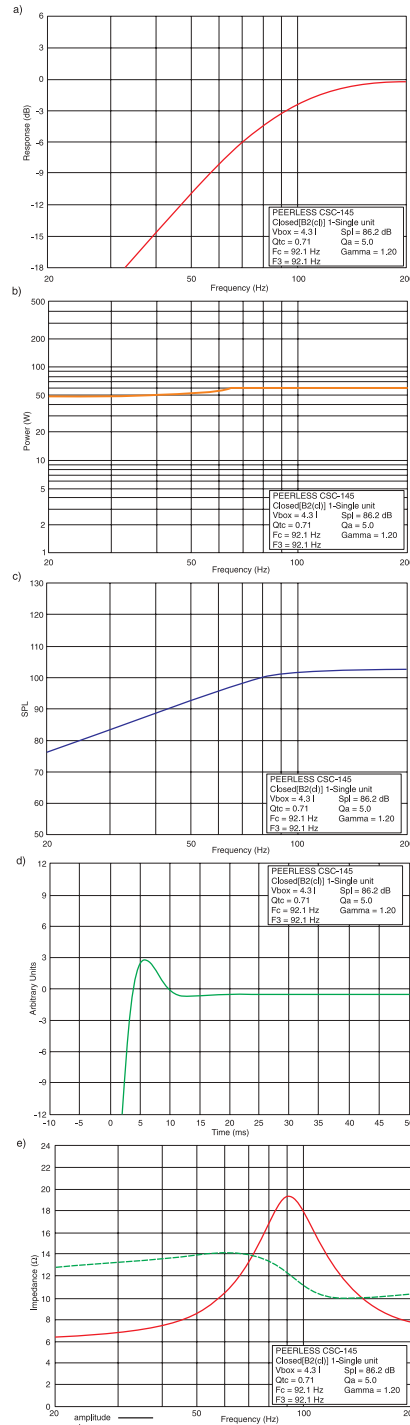
Jednak dla celów analizy porównawczej, w dalszej części, dla wszystkich głośników przeprowadziliśmy symulacje zakładając $Q_a=5$, i $\gamma=1,2$. Najważniejsze zależności i wypływające z nich wnioski pozostaną niezmiennie, niezależnie od poziomu strat i wytłumienia.

Pierwsza sesja porównawcza odbędzie się w obrębie samego głośnika CSC-145. Zaczynając od sprawdzonej już dobroci $Q_{tc}=0,71$, sprawdzimy też wszystkie charakterystyki dla dwóch „sąsiednich“ wartości Q_{tc} .

Charakterystyka przetwarzania dla $Q_{tc}=0,71$ (rys. 2) ma spadek -3 dB przy 92 Hz, a spadek -6 dB przy 70 Hz. Charakterystyka mocowa spada od deklarowanego przez producenta poziomu 60 W, do



Rys. 1. Głośnik CSC-145 w obudowie zamkniętej o parametrach: $Q_{tc}=0,71$, $f_c=85 \text{ Hz}$, $V_b=6 \text{ dm}^3$, charakterystyka przetwarzania (a), charakterystyka wytrzymałości (b), charakterystyka poziomu maksymalnego (c), charakterystyka impulsowa (d), charakterystyka modułu impedancji (e).

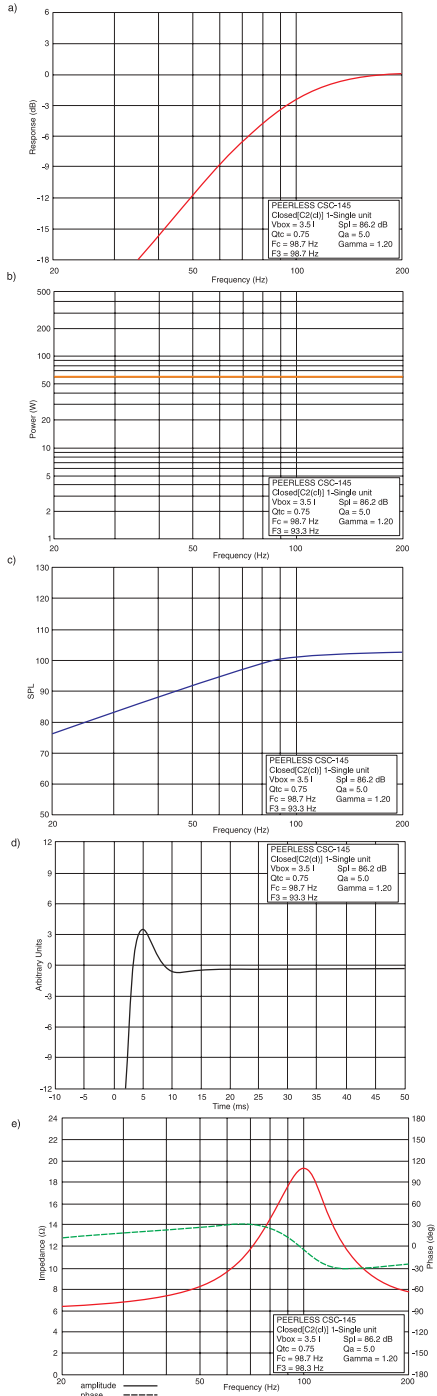


Rys. 2. Głośnik CSC-145 w obudowie zamkniętej o parametrach: $Q_{tc}=0,71$, $f_c=92 \text{ Hz}$, $V_b=4,3 \text{ dm}^3$, charakterystyka przetwarzania (a), charakterystyka wytrzymałości (b), charakterystyka poziomu maksymalnego (c), charakterystyka impulsowa (d), charakterystyka modułu impedancji (e).

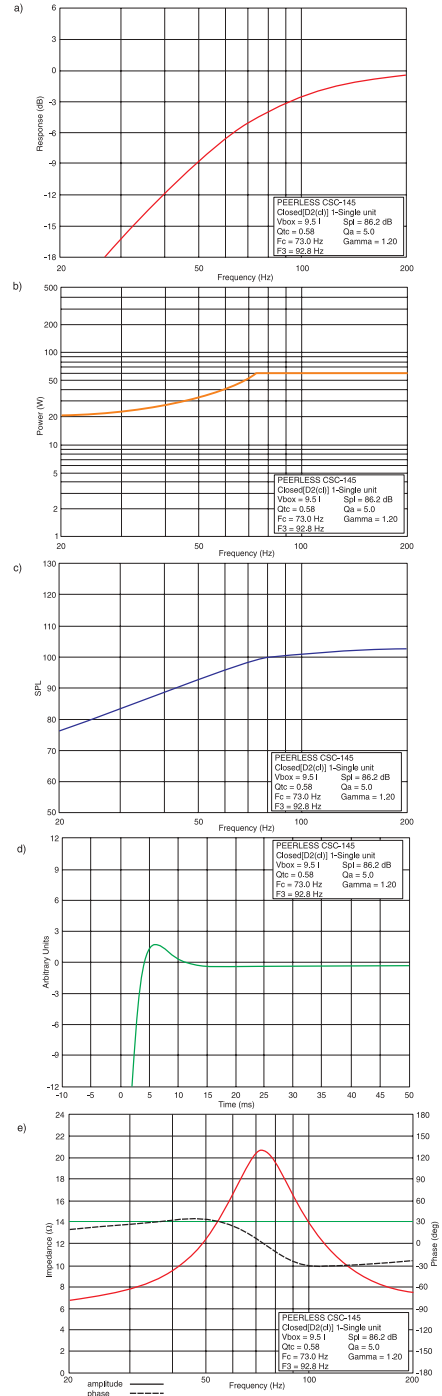
poziomu ok. 50 W przy częstotliwościach niższych od 50 Hz, co jest jednak spadkiem niewielkim i świadczy, że tak zaaplikowany CSC-145 może przyjąć moc do 50 W w całym pasmie, począwszy od częstotliwości najniższych, co dla głośnika 14-cm jest wynikiem bardzo dobrym. Stało się to jednak właśnie kosztem pasma przetwarzania - spadek -6 dB przy 70 Hz nie pozwoli nazwać konstrukcji opartej na takiej aplikacji CSC-145 mianem pełnopas-

mowej, choć w ramach standardu minimitora wynik można uznać za satysfakcjonujący. Zalecą jest tutaj również bardzo mała objętość obudowy.

Chcąc osiągnąć pełną maksymalną moc 60 W w całym pasmie, należy nawet jeszcze zmniejszyć obudowę - do 3,5 litra, przechodząc tym samym do nieco wyższej dobroci $Q_{tc}=0,75$ (rys. 3). Teraz spadek -3 dB pojawia się przy 93 Hz, a -6 dB przy 73 Hz, czyli tylko minimalnie wyżej.



Rys. 3. Głośnik CSC-145 w obudowie o parametrach: $Q_{tc}=0,75$, $f_c=99$ Hz, $V_b=3,5$ dm³, charakterystyka przetwarzania (a), charakterystyka wytrzymałości (b), charakterystyka poziomu maksymalnego (c), charakterystyka impulsowa (d), charakterystyka modułu impedancji (e)



Rys. 4. Głośnik CSC-145 w obudowie o parametrach: $Q_{tc}=0,58$, $f_c=73$ Hz, $V_b=9,5$ dm³, charakterystyka przetwarzania (a), charakterystyka wytrzymałości (b), charakterystyka poziomu maksymalnego (c), charakterystyka impulsowa (d), charakterystyka modułu impedancji (e)

Natomiast dążąc w drugą stronę - do obniżenia częstotliwości granicznej - można zaproponować objętość 9,5 litra, w której dobroć $Q_{tc}=0,58$, z charakterystyką Bessela (rys. 4). Pouczające jest, że spadek -3 dB wcale nie przesuwają się niżej - pozostaje przy 93 Hz - jednak -6 dB trochę zyskało - lokuje się przy 64 Hz. Ponadto porównując charakterystyki impulsowe, widzimy mniejszą oscylację. Ale coś za coś. Poważnym kompromisem zostaje obciążona charakterystyka wytrzymałości - spada ona do poziomu tylko 20 W na skraj pasma (przy 20 Hz), pełną moc 60 W mamy dopiero powyżej 70 Hz. Zysaliśmy więc lepsze charakterystyki impulsowe i tylko trochę na „rozciągnięciu” basu, dużym kosztem wytrzymałości. Decydując się na takie rozwiązanie, musimy być świadomi jego ograniczeń - w zakresie najniższych tonów głośnik doprowadzi do przesterowania już połowy tej mocy, którą wytrzyma on przy wcześniejszych układach.

Porównajmy jeszcze charakterystyki poziomu maksymalnego. Dla wszystkich trzech obudów są bardzo podobne. Zjawisko można wyjaśnić następująco. To, co w dużej objętości zyskiwaliśmy na charakterystyce przetwarzania, traciliśmy na wytrzymałości, i w sumie na jedno wychodzi - głośnik jest w zakresie najniższych częstotliwości zdolny wytworzyć takie maksymalne ciśnienie akustyczne, jakie jest określone przez jego niezmiennie maksymalne wychylenie objętościowe - tyle że może się to stać za pomocą większej lub mniejszej (w zależności od wielkości obudowy) dostarczonej mocy elektrycznej.

Dla dopełnienia formalności spójrzmy jeszcze na charakterystyki impedancji. Częstotliwość rezonansowa, sygnalizowana przez szczyt charakterystyki, przesuwa się oczywiście w dół skali wraz ze zwiększaniem objętości, czyli obniżaniem Q_{tc} . Przesunięcie fazowe przy tej częstotliwości wynosi zero, a osiąga +30° około pół oktawy poniżej i -30° około pół oktawy powyżej, a dalej od częstotliwości rezonansowej powoli zbliża się do zera.

Drugi przebadany głośnik to 17-centymetrowy nisko-średniotonowy Peerless CSX-176. O średnicy tylko 3 cm większej od CSC-145, ale jak się okaże, o znacznie większych możliwościach.

Producent deklaruje dla tego głośnika zaskakująco wysoką moc znamionową, ponownie określoną według rygorystycznych norm IEC. Owszem, są przesłanki, aby CSX-176 miał wyższą wytrzymałość termiczną, niż CSC-145 - jego cewka drgająca ma zarówno większą średnicę, jak i długość. Oczywiście większa długość, przy podobnej wysokości szczeliny magnetycznej, zwiększa wychylenie maksymalne liniowe, a wraz z większą powierzchnią membrany, znacznie zwiększa wychylenie objętościowe, tutaj dwa i pół raza większe niż w przypadku CSC-145. Stąd też będzie wynikał znacznie wyższy poziom maksymalnego ciśnienia.

Naturalne jest też, że głośnik większy ma niższą częstotliwość rezonansową od swojego mniejszego „kolegi”, a także większą objętość ekwiwalentną. Jednocześnie

jednak CSX-176 został bardzo podobnie zaprojektowany pod względem parametrów dobroci. Współczynnik EBP dla CSX-176 spada poniżej 100, co już bez żadnych „ale” pozwala użyć go w obudowie zamkniętej. Na pierwszy rzut oka można stwierdzić, że przy analogicznych wariantach strojenia Q_{tc} , CSX-176 będzie osiągał niższe częstotliwości graniczne niż CSC-145, wymagając w zamian obudowy o znacznie większej objętości (skoro dobroć Q_{ts} dla obydwu głośników jest na podobnym poziomie, to odpowiednio obudowy będą dla CSX-176 o tyle większe, o ile ma większy V_{as}).

Od razu uruchamiamy symulacje, tak jak poprzedni, zakładając $R_g=0,5$, $Q_a=5$ i $\gamma=1,2$, i porównujemy wyniki dla trzech różnych wartości Q_{tc} .

Zaczynamy od standardowej wartości $Q_{tc}=0,71$ (rys. 5). Potrzebna jest do tego objętość $10,2 \text{ dm}^3$ (bardzo wygodna dla konstrukcji podstawkowej z głośnikiem 17-centymetrowym) i uzyskujemy w niej spadek -3 dB przy 69 Hz , a -6 dB przy 52 Hz . Jesteśmy więc z tymi spadkami prawie pół oktawy niżej niż przy głośniku CSC-145 pracującym z dobrocią $Q_{tc}=0,71$. Charakterystyka wytrzymałości co prawda nie utrzymuje w zakresie najniższych częstotliwości wygórowanego poziomu 150 W , ale poniżej 40 Hz pozostaje w pobliżu 100 W , co i tak dla tej wielkości głośnika jest wynikiem bardzo dobrym. Należy też pamiętać, że większa część mocy w materiałach muzycznych lokuje się powyżej 40 Hz , a tony najniższe pojawiają się okazjonalnie.

Gdybyśmy jednak uparli się, aby utrzymać moc 150 W aż do granicy 20 Hz ,



Rodzina głośników CSX - na zdjęciu modele 14-, 17- i 21-cm. W naszym przykładzie użyliśmy głośnika 17-cm, czyli CSX-176.

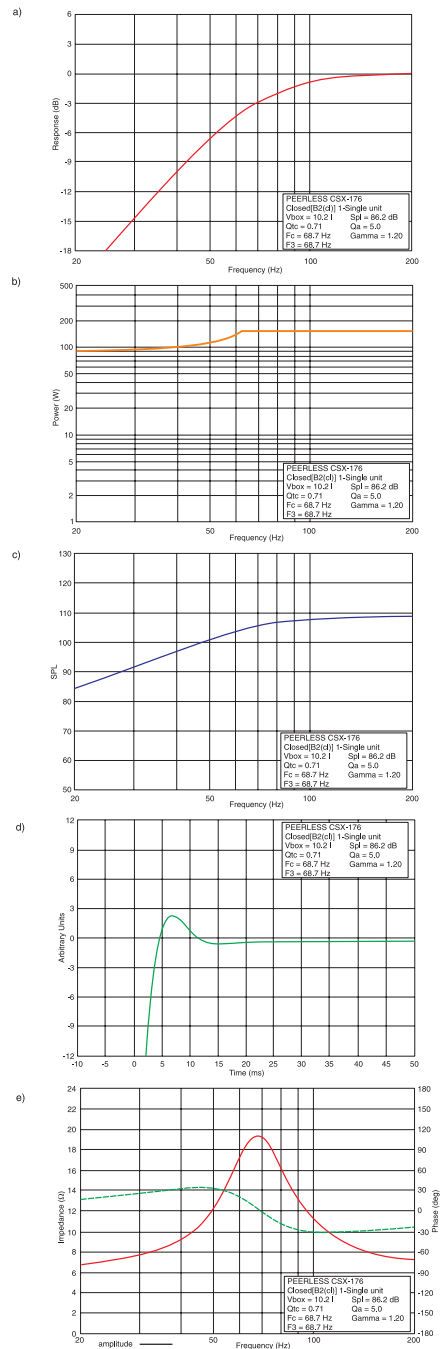
17-centymetrowy CSX-176 (P850122) ma następujące parametry:

F_s [Hz]	38
Q_{es}	0,53
Q_{ms}	2,22
Q_{ts}	0,43
V_{as} [dm^3]	28
R_e [Ω]	6,1
S_d [cm^2]	143
X_{lin} [cm]	1,1
Moc [W]	150

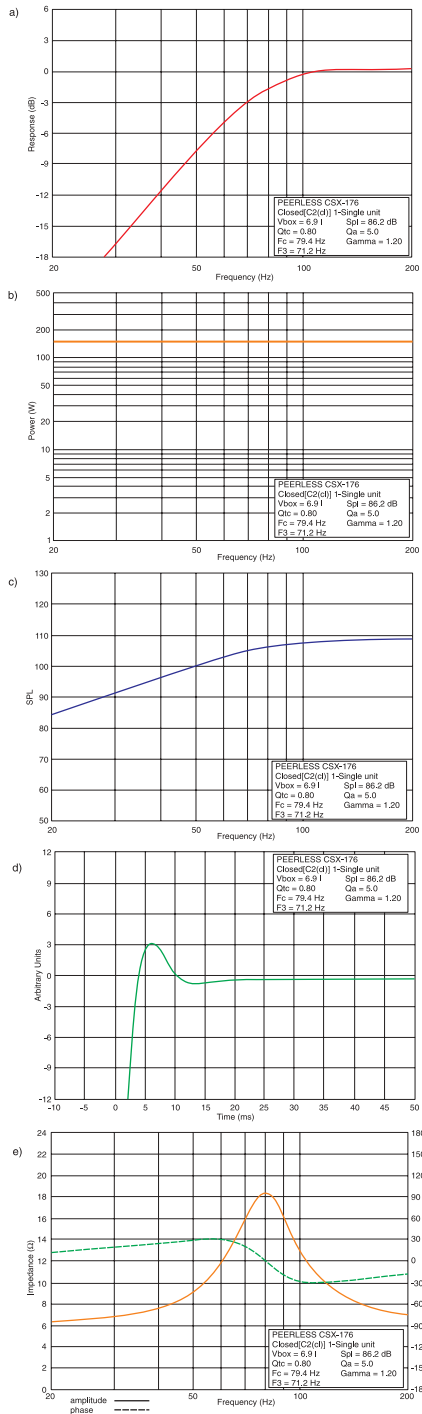
wówczas musimy zmniejszyć objętość do $6,9 \text{ litra}$ (rys. 6), co spowoduje podniesienie dobroci do $Q_{tc}=0,8$, a spadki -3 dB i -6 dB przesuną się do odpowiednio 71 Hz i 57 Hz - i te wyniki pozostają zadowalające.

Natomiast próba z dobrocią $Q_{tc}=0,58$ wykazuje, że potrzebna jest już znaczna objętość - 22 litry raczej nie są możliwe do uzyskania w obudowie podstawkowej, musiałyby to być konstrukcja wolnostojąca.

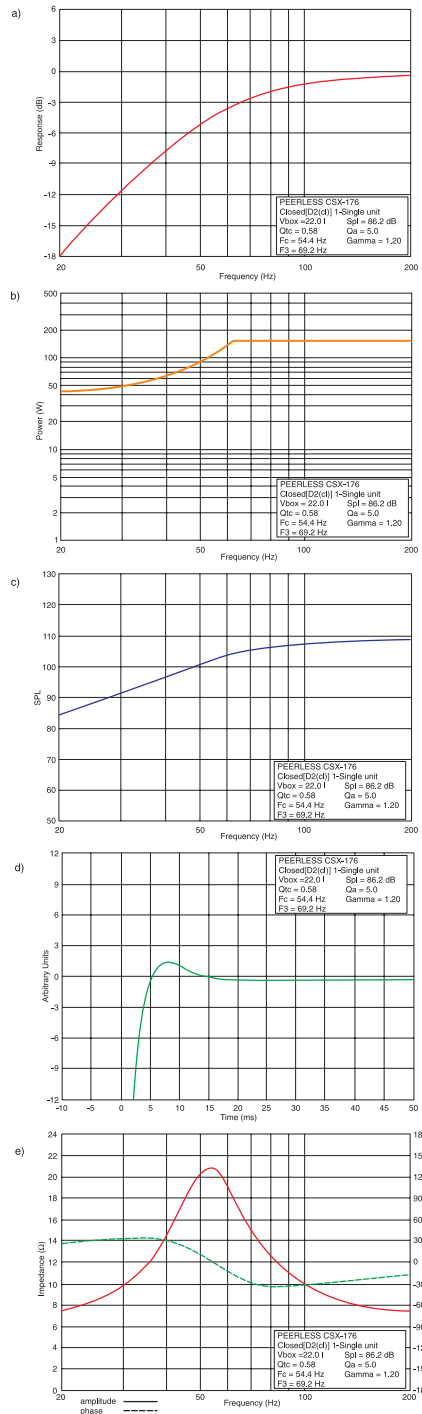
Spadki 3- i 6-decybelowe obniżają się do 69 Hz i 47 Hz , a więc dość nieznacz-



Rys. 5. Głośnik CSX-176 w obudowie o parametrach: $Q_{tc}=0,71$, $f_c=69 \text{ Hz}$, $V_b=10 \text{ dm}^3$, charakterystyka przetwarzania (a), charakterystyka wytrzymałości (b), charakterystyka poziomu maksymalnego (c), charakterystyka impulsowa (d), charakterystyka modułu impedancji (e)



Rys. 6. Głośnik CSX-176 w obudowie o parametrach: $Q_{tc}=0.8$, $f_c=79$ Hz, $V_b=6.9$ dm³, charakterystyka przetwarzania (a), charakterystyka wytrzymałości (b), charakterystyka poziomu maksymalnego (c), charakterystyka impulsowa (d), charakterystyka modułu impedancji (e)



Rys. 7. Głośnik CSX-176 w obudowie o parametrach: $Q_{tc}=0.58$, $f_c=54$ Hz, $V_b=22$ dm³, charakterystyka przetwarzania (a), charakterystyka wytrzymałości (b), charakterystyka poziomu maksymalnego (c), charakterystyka impulsowa (d), charakterystyka modułu impedancji (e)

nie, ale równocześnie, jak można było tego oczekiwać przy niższej dobroci, poprawia się charakterystyka impulsowa. Nie mniej ważna jest jednak charakterystyka wytrzymałości, a po przestudiowaniu poprzedniego przykładu już wiemy, że teraz ulegnie ona osłabieniu. Od poziomu referencyjnego 150 W, moc spada do 50 W przy 30 Hz i 40 W przy 20 Hz. Z jednej strony osłabienie względem zastosowania CSX-176 w mniejszych objętościach jest bardzo wyraźne, z drugiej strony charakterystyka wytrzymałości wydaje się nadal dostatecznie dobra, aby zapewnić bezpieczną pracę w „normalnych” warunkach. Ale właśnie w takich sytuacjach wyboru trzeba dokonywać na własną odpowiedzialność - czy stawiamy na maksymalną wytrzymałość, czy najlepszy impuls wraz z najniższym zejściem basu. Wszystkie trzy przedstawione opcje są dopuszczalne, tak jak też każde strojenie leżące w przedstawionym zakresie Q_{tc} (0,58...0,8). Dla wartości niższych od 0,58, a więc dla objętości większych od 22 litrów, wytrzymałość w zakresie najniższych częstotliwości spadłaby już do niekomfortowo niskiego poziomu, a ustalenie dobroci wyższych od 0,8 nie ma sensu, gdyż pełną wytrzymałość w całym pasmie uzyskaliśmy już na tym poziomie, i zmniejszając obudowę tylko tracilibyśmy na paśmie przenoszenia i charakterystyce impulsowej, nie otrzymując nic w zamian.

Podsumowując wyniki uzyskane dla dwóch głośników nisko-średniotonowych, 14-cm CSC-145 i 17-cm CSX-176, stwierdzamy, że różnice w ich możliwościach i wielkościach rekomendowanych obudów są znacznie większe, niż sugerowałaby to tylko różnica ich wielkości. Pierwszy z nich najlepiej nadaje się do obudowy o objętości do 5 dm³, a więc do małego, podstawkowego/regalowego „minimonitora”, lub do ściennego głośnika „efektowego” w systemie wielokanałowym. Jego pasmo przenoszenia jest ograniczone wysokim współczynnikiem EBP, na co wpływa głównie wysoka częstotliwość rezonansowa, ale spadek -6 dB przy 70 Hz nie dyskwalifikuje. Nasuwa się jednak pomysł stosowania CSC-145 w satelitach, w systemach wykorzystujących subwoofer.

Drugi głośnik, CSX-176, gwarantuje znacznie więcej, zarówno pod względem dolnej częstotliwości granicznej (spadek -6 dB w okolicach 50 Hz), jak i mocy, a można go zainstalować zarówno w ok. 10-litrowej konstrukcji podstawkowej, jak i ok. 20-litrowej wolnostojącej.

Za miesiąc będziemy badać głośniki 21-, 26- i 31-cm.

Andrzej Kisiel