

# Stavíme reproduktorové soustavy (X)

RNDr. Bohumil Sýkora

Výhybky jsou velice vědním tématem pro teoretický výzkum i praktické experimentování. Pokud se někde hovoří o „ladění“ reproduktorových soustav, rozumí se tím zpravidla nastavování výhybek tak, aby výsledek splňoval požadavky nebo představy konstruktéra a, což je možná ještě důležitější, jeho spolupracovníků, přátel, příbuzných, a ovšem kritiků. Veškeré s tím spojené pachtění má samozřejmě naději na úspěch pouze za předpokladu, že výchozí koncept výhybky byl zvolen správně. Zatím jsme si v konkrétnější podobě probrali nejjednodušší možnou výhybku, dvoucestnou se stromostí 6 dB na oktávu. I na té se lze dost vyřádit - můžeme měnit mezní kmitočty jednotlivých větví (a tím i dělicí kmitočty), můžeme kompenzovat impedanční charakteristiky reproduktorů a vyrovnávat rozdíly citlivostí měničů. Ta pravá zábava však nastane, začneme-li pracovat s výhybkami složitějšími, s větší stromostí, případně větším počtem pásem. Nejprve se podíváme, jak je to s těmi stromostmi.

Nejbližší vyšší typ výhybky je varianta se stromostí 12 dB na oktávu v obou větvích. Je možné a někdy i účelné kombinovat v různých větvích různé stromosti, touto možností se však zatím nebudeme zabývat. Podíváme se rovnou, jak vypadá zapojení takové výhybky - jeho nejjednodušší varianta je na obr. 1. V každé větvi je po jednom kondenzátoru a jedné tlumivce, takže tvoří horní a dolní propust druhého stupně. Předpokládáme, že zátěže v obou větvích jsou odporové a mají shodné odpory R. Dolní i horní propust tohoto typu je charakterizována mezní frekvencí, která je dána vzorcem:

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}, \text{ případně } \omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

Pokud vám tento vzorec připomíná výraz pro rezonanční kmitočet obvodu LC, ať již sériového či paralelního, nemýlíte se. Napětový přenos propustí můžeme - podobně jako v předchozí části - vyjádřit s využitím  $\omega_0$  v symbolicko-komplexní podobě poměrně jednoduše vzorcem:

dolní propust

$$T(\omega) = 1/(1 + (j\omega/Q\omega_0) - \omega^2/\omega_0^2)$$

horní propust

$$T(\omega) = -(\omega^2/\omega_0^2)/(1 + (j\omega/Q\omega_0) - \omega^2/\omega_0^2)$$

Já vím, ono to zas tak jednoduše nevypadá, ale z toho si nic nedělejte, pro méně zasvěcené jsou ty vzorečky uvedeny hlavně proto, aby bylo vidět, že kromě mezní frekvence se v nich vyskytuje ještě jeden parametr, a to činitel jakosti Q. U obvodů podle obr. 1 (předpokládáme stejné mezní

frekvence u dolní i horní propusti) je jeho velikost dána výrazem:

$$Q = R \cdot \sqrt{C/L}$$

Vliv činitele jakosti na amplitudovou charakteristiku ukazuje obr. 2, na kterém jsou tři takové charakteristiky pro dolní propust s mezním kmitočtem 1 kHz, a s činiteli jakosti 0,5, 0,71 a 1. Horní propust by měla charakteristiky stejné, jen zrcadlově obrácené kolem souřadnicové čáry pro 1 kHz. Vliv činitele jakosti nás ovšem hlavně zajímá, pokud jde o vlastnosti výsledné výhybky, a z tohoto hlediska jsou podstatně dvě varianty - varianta s  $Q = 1/2$  a varianta s  $Q = 1/\sqrt{2}$  (což je přibližně 0,71). Pro první případ lze ukázat (matematiku už necháme stranou), že u příslušné výhybky je **konstantní, tj. na kmitočtu nezávislá amplituda rozdílu výstupních napětí**. V druhém případě je konstantní součet druhých mocnin amplitud na obou výstupech, a jelikož druhé mocniny amplitudy napětí na odporové zátěži je úměrný příkon do této zátěže, znamená to, že v tomto případě je **konstantní celkový příkon**.

Co to prakticky znamená, použijeme-li ten či onen typ výhybky v reproduktorové soustavě? Předpokládejme, že akustické tlaky produkované měniči v jisté vzdálenosti jsou přímo úměrné napětím na ně přivedeným a konstanty úměrnosti jsou pro oba měniče shodné (máme tedy dva ideální měniče se shodnými citlivostmi). Předpokládejme dále, že výsledný akustický tlak je v celém prostoru dán jako součet dílčích akustických tlaků z obou měničů (to dostatečně přesně platí, pokud je vzdálenost mezi měniči menší než desetina vlnové délky vyzařovaného zvuku). Pak, použijeme-li variantu výhybky s činitelem jakosti 1/2, přičemž měniče zapojíme s navzájem opačnými polaritami, bude amplituda výsledného akustického tlaku kmitočtově nezávislá.

Opačné pólování je nutné proto, že na elektrické straně je zachována konstantní amplituda rozdílu napětí, takže musíme polaritu jedné větve obrátit, abychom dostali také rozdílu akustických tlaků. Výhybka tohoto typu se v literatuře někdy označuje jako typ Linkwitz - Riley. Mimochodem, o amplitudě stále hovoříme proto, že pro úplný popis bychom vlastně potřebovali znát časový průběh, což obcházíme symbolicko-komplexním vyjádřením. V něm je napětí popsáno amplitudou a fází a o nějaké „konstantnosti“ fáze u výhybky druhého

stupně nemůže být ani řeč (i když leckterí výrobci se leccíms takovým chlubí).

Pokud není splněna podmínka dostatečně malé vzdálenosti měničů, sčítají (případně odečítají) se přesně akustické tlaky jen v některých místech, mimo jiné na rovině symetrie dvojice měničů (a tím také na ose kolmé k čelní stěně případné reproduktorové soustavy). Z hlediska poslechové praxe to není příliš příznivé, protože přesně na ose či rovině symetrie se poslouchá málokdy.

Při poslechu v obecném bodě a dostatečně velké vzdálenosti od soustavy se na celkovém dojmu podstatnou měrou podílí zvuk, který se k uchu dostává prostřednictvím odrazů. Odrazy v poslechovém prostoru vytvářejí tzv. difúzní pole, jehož intenzita v závislosti na kmitočtu je dána převážně celkovým vyzářeným výkonem. Pokud chceme, aby tato intenzita byla na kmitočtu nezávislá, musíme za popsáných okolností volit spíše výhybku s činiteli jakosti  $1/\sqrt{2}$ . (Tento typ se označuje jako Butterworth.) U ní je konstantní celkový příkon, což u kombinace vzdálených měničů znamená i konstantní celkový výkon. Amplitudová charakteristika na ose sice nebude rovná, bude vykazovat převýšení 3 dB na dělicí frekvenci, to však může být menší zlo. Je také možné volit činitel jakosti někde mezi 0,5 a 0,71 a nalézt tak kompromis mezi vyrovnáním charakteristiky osové a výkonové. Podotkneme ještě, že při dostatečně malé vzdálenosti měničů ze splnění podmínky konstantní amplitudy vyplývá automaticky splnění požadavku konstantního výkonu, takže pak kompromisy hledatí netřeba.

Zbývá ještě uvést vzorce, podle kterých vypočítáme součástky výhybky pro mezní frekvenci filtru  $f_0$ . Při činiteli jakosti 0,5 platí:

$$L = R/\pi f_0$$

$$C = 1/\pi f_0 R$$

Pro činitel jakosti  $1/\sqrt{2}$  pak musíme použít součástky o hodnotách:

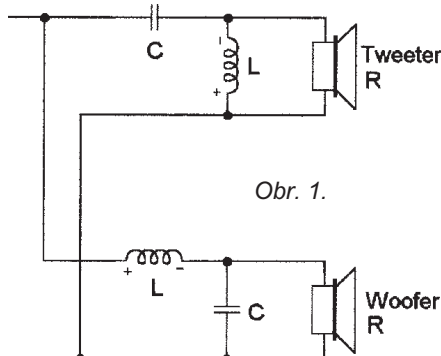
$$L = R/(\pi f_0 \sqrt{2})$$

$$C = \sqrt{2}/\pi f_0 R$$

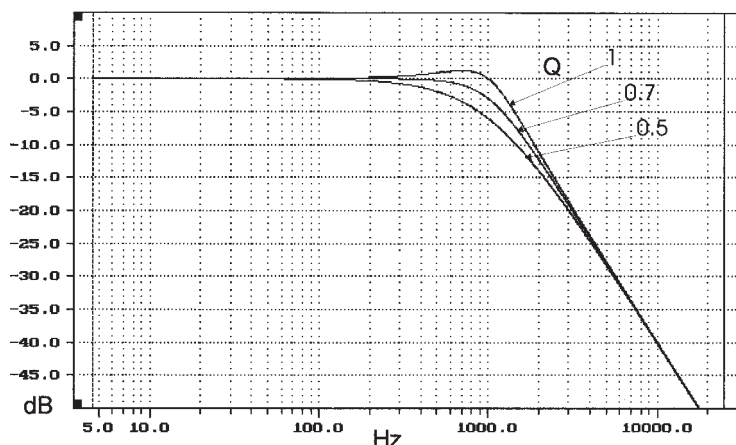
Vzorce platí pro obě větve filtru ve stejném tvaru, takže hodnoty součástek v obou větvích jsou stejné, pokud jsou pro obě větve stejné mezní frekvence a činitele jakosti. Pokud bychom potřebovali nastavit větve na různé mezní frekvence nebo činitele jakosti, použijeme vzorce s tím, že dosadíme hodnoty konstant a frekvence pro příslušnou větev a vypočtené L a C pak samozřejmě použijeme jen pro tuto větev.

Obdobně by se postpovalo v případě, že by zatěžovací impedance v obou větvích nebyly shodné. Pro reálné reproduktory s kmitočtově závislou impedancí je samozřejmě nutné hodnoty součástek zkorigovat podle měření, případně výhybku doplnit o kompenzační obvody.

(Pokračování příště)



Obr. 1.



Obr. 2.

# Stavíme reproduktorové soustavy (XI)

RNDr. Bohumil Sýkora

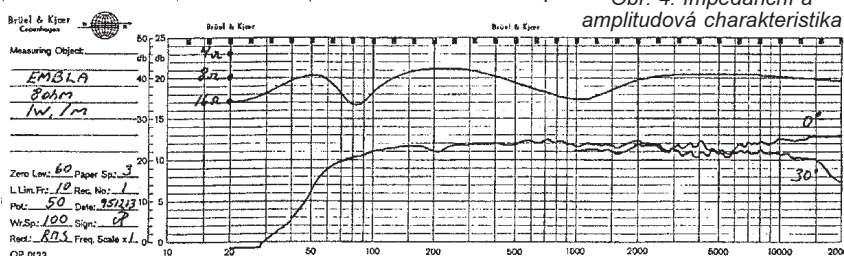
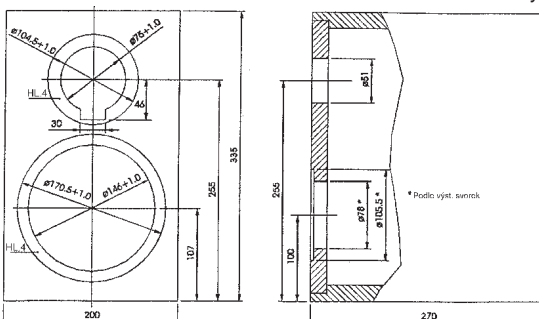
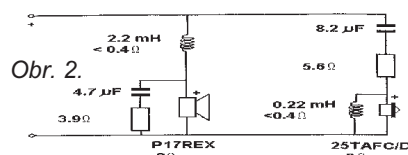
Zatím jsme - ovšem dosti zjednodušeně - probrali výhybky se strmostí 6 a 12 dB na oktávu. Jistě bude užitečné, když poněkud upřesníme, co ty decibely na oktávu vlastně znamenají. Výhybka se chová jako soustava filtrů, které v jistém kmitočtovém pásmu (propustném pásmu) signál propouštějí bez podstatných změn (to se týká především amplitudy), a mimo toto pásmo jej potlačují. To potlačení samozřejmě neznamená, že signál vůbec neprojde. Je pouze utlumen, a to zpravidla tím více, čím je jeho kmitočet více vzdálen od propustného pásma, případně jeho příslušné hraniční frekvence. U filtrů používaných ve výhybkách je vcelku pravidlem, že přenos mimo propustné pásmo je přibližně přímo nebo nepřímo úměrný některé mocnině kmitočtu. U dolní propusti je úměrnost nepříma, u horní pak přímá a je obecně splněna tím přesněji, čím je dosažený přenos menší, anebo, chcete-li, čím je větší útlum. U ideálního výhybkového filtru složeného z diskretních součástek (filtr se soustředěnými parametry) a zatíženého odporem je mocnina kmitočtu v úměrnosti vždy celistvá a její stupeň vynásobený šestkou dává počet decibelů na oktávu. stupeň současně udává i minimální počet reaktivních součástek, tj. tlumivěk nebo kondenzátorů, kterých je pro realizaci příslušného filtru zapotřebí. Například: dolní propust se strmostí 6 dB na oktávu má přenos mimo propustné pásmo přibližně nepřímo úměrný kmitočtu (vlastně 1. mocnině kmitočtu) a pro její realizaci je nutná nejméně jedna tlumivka nebo kondenzátor, přičemž v praxi přichází v úvahu spíše tlumivka.

Se stupněm výhybky souvisí ještě jedna důležitá věc. Dělicí filtry, které tvoří výhybku, mají na mezní frekvenci jistý útlum. Pokud jsou stejného druhu a mají společnou mezní (v tomto případě dělicí) frekvenci, takže jejich amplitudové charakteristiky jsou podle této frekvence zrcadlově sdružené, mají oba na mezní frekvenci útlum stejný a jejich amplitudové charakteristiky se zde protínají. Útlum na dělicí frekvenci je důležitým parametrem výhybky. U základního provedení prvního stupně je 3 dB a pokud by byla zapotřebí jiná velikost, bylo by nutné filtry rozladit, tedy nastavit dolní propust na jinou frekvenci než horní propust. U výhybek vyššího stupně již máme možnost útlum na dělicí frekvenci určit i bez rozladování, např. v minulě popisované výhybce druhého stupně volbou činitele jakosti, u výhybek vyššího stupně pak volbou vhodné kombinace parametrů přenosové funkce. Teorie ukazuje, že u výhybek lichého stupně, tedy se strmostí např. 6 nebo 18 dB na oktávu, je nejvhodnější, aby útlum na dělicí frekvenci byl právě 3 dB. Z teorie dále vyplývá, že u výhybek sudého stupně, většinou tedy se strmostí 12 nebo 24 dB na oktávu, je účelné volit tento útlum v rozmezí 3 až 6 dB. Rozhodování mezi typem Butterworth (3 dB) a Linkwitz-Riley (6 dB), o kterém byla řeč

v minulé části, je tudíž záležitostí zcela obecnou. Nutné je přitom zdůraznit, že rozhodující je výsledná charakteristika přenosu z elektrického vstupu na akustický výstup. Připomeňme si, že dynamický reproduktor se sám o sobě chová jako horní propust se strmostí 12 dB na oktávu, což má na chování výsledné elektroakustické soustavy podstatný vliv. Vlastně by se vždy mělo hovořit o elektrické a elektroakustické části výhybky. Např. vysokotónový reproduktor s elektrickou výhybkou o strmosti 6 dB na oktávu tvoří vlastně hornopropustný filtr s mezní strmostí 18 dB na oktávu.

Strmost výhybky (její elektrické části) je parametr velmi zásadního významu a jeho správná volba je jedním z prvních úkolů, který je třeba při návrhu výhybky splnit. Z hlediska výsledného chování reproduktorové soustavy je strmost podstatná hlavně proto, že v oblasti kolem dělicího kmitočtu hraje oba reproduktory příslušných pásem se srovnatelnou úrovní a jejich funkce se ne právě zanedbatelným způsobem ovlivňují. Jedním z důsledků tohoto ovlivňování je značná komplikovanost směrové charakteristiky výsledné dvojice zářičů, která je navíc kmitočtově závislá a tím větší, čím je vlnová délka na dělicí frekvenci menší v porovnání se vzdáleností reproduktorů. To má hlavní význam u dělení pro vysoký reproduktor a na něj navazující basový (u dvoupásmových soustav) nebo středový (u vícepásmových soustav). Oblast, v níž se měniče ovlivňují, je tím užší, čím větší je strmost výhybky. Se zvětšováním strmosti ovšem narůstá počet součástek a kritičnost jejich tolerancí. Také fázová charakteristika realizované soustavy zářičů je při větší strmosti výhybky „divočejší“. Proto se v praxi užívají nejčastěji výhybky prvního až třetího stupně, tedy se strmostí 6 až 18 dB na oktávu. Výhybky se strmostí 24 dB najdeme v pasivních soustavách spíše výjimečně a větší strmosti se vyskytují už jen v systémech s aktivními nevykonovými výhybkami.

U dělicích filtrů vyššího stupně převažují výhody nad případnými nevýhodami hlavně



tehdy, když roli hraje zatížení reproduktorů, a to platí především pro vysokotónové reproduktory. U nich je zapotřebí, aby se maximální měrou omezilo zatížení signály nízkých kmitočtů, které by se pouze měnily v teplo (nízkým kmitočtem v tomto případě rozumíme signál o frekvenci menší, než je rezonanční frekvence reproduktoru). Tyto signály by navíc zbytečně mechanicky namáhaly kmitací systém reproduktoru.

Jak jsme si již dříve řekli, v oblasti nad rezonanční frekvenci je výchylka kmitacího systému nepřímo úměrná druhé mocnině frekvence signálu. To je nevyhnutelné zlo. Mezní frekvence filtru pro vysokotónový reproduktor vždy leží nad rezonanční frekvencí a je účelné volit strmost tohoto filtru tak, aby se pod mezní frekvenci výchylka zbytečně nezvětšovala. U filtru druhého stupně, tedy se strmostí 12 dB na oktávu, se přirozený nárůst výchylky právě kompenzuje poklesem přenosu filtru. Z tohoto hlediska je účelné pro vysokotónový reproduktor používat výhybku alespoň této strmosti. Menší strmost, tj. 6 dB na oktávu, je vhodná pouze pro speciálně konstruované měniče, případně je omluvitelná u levných konstrukcí.

Uspořádání výhybky se strmostí 18 dB na oktávu je uvedeno na obr. 1. Hodnoty součástek jsou stanoveny pro požadavek, aby přenos filtrů na mezní frekvenci byl -3 dB a amplitudová charakteristika byla maximálně plochá (přenosová funkce Butterworthova typu). Výhybka (filtr) třetího stupně má totiž oproti výhybce druhého stupně další stupeň volnosti a není tedy popsána jen mezním kmitočtem, jak je tomu u prvního stupně se strmostí 6 dB na oktávu, nebo mezním kmitočtem a útlumem na dělicím kmitočtu, případně činitelem jakosti, jimiž je popsána výhybka druhého stupně (teoretické podrobnosti tentokrát vynecháme). To samozřejmě poskytuje další prostor pro „dolaďování“ s ohledem na specifické vlastnosti reproduktorů a samozřejmě také pro chyby. Optimalizace nastavení výhybky třetího stupně je tudíž prakticky nemožná bez průběžného měření a jejím výsledkem je takřka vždy zapojení, jehož hodnoty se podstatně liší od vypočtených.

Pro ilustraci praktického provedení reproduktorové soustavy s poněkud složitější výhybkou tentokrát předkládáme malou dvoupásmovou soustavu EMBLA (opět z konstrukční dílny firmy SEAS). Basová větev výhybky má strmost 6 dB na oktávu a kompenzaci indukčnosti reproduktoru, výšková větev má strmost 12 dB na oktávu a je doplněna odporem pro kompenzaci větší citlivosti vysokotónového měniče. Dělicí frekvence je přibližně 3 kHz. O konstrukci soustavy platí totéž, co jsme uváděli u dříve publikované stavebnice NJORD, snad jen s tou změnou, že vzhledem k menším rozměrům skříně není nutné vyztužování, pokud základní materiál má tloušťku alespoň 19 mm.

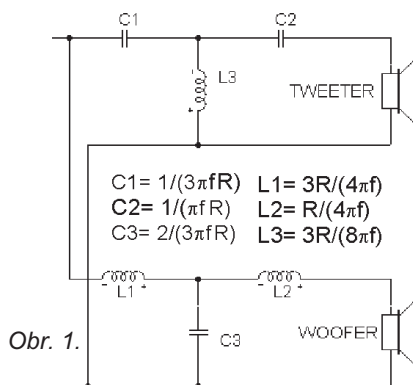
Reproduktory i součástky pro výhybky si můžete jednotlivě nebo jako stavebnici objednat u firmy Besie (nebo jejich autorizovaných prodejců).

Adresa: Evropská 37, 160 00 Praha 6, tel.: (02) 24 31 13 36, 312 33 58, fax: 24 31 13 53. Viz též inzerce v PE 1/98 s. XV.

(Pokračování příště)

Obr. 3. Mechanický výkres (tlumění - 50 mm syntetické vaty na všech stěnách kromě čelní stěny, bassreflex Ø 48 mm, délka 100 mm)

Obr. 4. Impedanční a amplitudová charakteristika



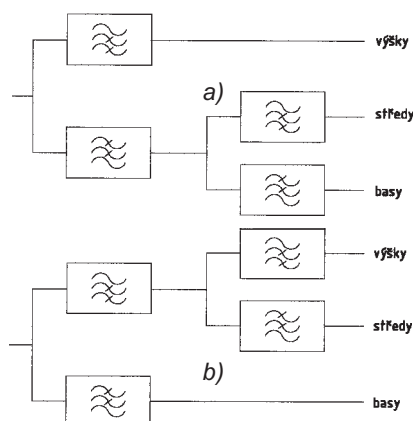
# Stavíme reproduktorové soustavy (XII)

RNDr. Bohumil Sýkora

Výhybky jsou téma takřka nevyčerpatelné a ovšem značně důležité. Náš seriál však není jen o nich, a tak se s nimi dnes rozloučíme pojednáním na téma vícepásmového uspořádání.

Dvoupásmové řešení reproduktorové soustavy se neobejde bez kompromisů, z nichž ten v hifi oblasti nejčastěji přijímaný a vcelkem nejméně problematický je oběť výkonu na nízkých kmitočtech. To je dáno, jak ostatně z předchozího výkladu vyplývá, tím, že u dvoupásmové soustavy musí basový měnič fungovat i jako středový, následkem čehož nemůže být příliš velký a tudíž nemůže na nízkých kmitočtech produkovat příliš velký akustický výkon. Pozor, nejde o amplitudovou charakteristiku, ta může sahát i dosti hluboko, ani o „elektrické watt“ napsané na typovém štítku, nýbrž jen a jen o skutečně vyzářený akustický výkon. Nejprůchoďnější cestou k většímu akustickému výkonu je použití basového měniče s větším průměrem, tedy zpravidla 20 a více cm. To obvykle znamená nutnost použít samostatný středotónový měnič a tím - považujeme-li dvoupásmovou konstrukci za jakési filosofické východisko - i rozdělení signálu dolního pásma na pásma dvě, na vlastní basy (zpravidla do 300 až 800 Hz) a středy (od uvedené frekvence k dělicí frekvenci vysokotónového měniče, což je obvykle 2 až 5 kHz). Možná jsou samozřejmě i uspořádání čtyř a vícepásmová, používají se však celkem zřídka a zde se jimi zabývat nebudeme.

Existují v zásadě dvě hlavní možnosti, jak zkonstruovat třípásmovou výhybku. První z nich je praktickou realizací právě popsaného logického postupu. Vezmeme prostě dvoupásmovou výhybku a na výstup jedné její větve připojíme další dvoupásmovou

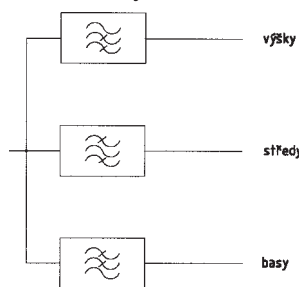


Obr. 1a, b. Dvě možné varianty třípásmové výhybky v kaskádním uspořádání

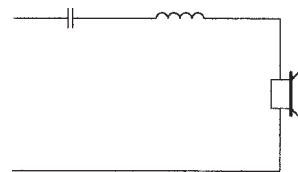
výhybku. Podle předchozího textu by se tato druhá výhybka připojovala na výstup „středobasové“ sekce původní dvoupásmové výhybky (blokové schéma na obr. 1a). Je však možné - a někdy je to i výhodnější hlavně z hlediska fázových charakteristik - udělat to obráceně, tedy navrhnout první výhybku na dělení basy/středy a na středový (případně středový/výškový výstup) přivést výhybku pro dělení středy/výšky (obr. 1b).

Základním problémem tohoto uspořádání v obou jeho variantách je to, že jeden z výstupů první výhybky je zatížen vstupem druhé výhybky. Řekli jsme si toho dost o neblahém vlivu kmitočtové závislosti zatěžovacích impedancí na funkci výhybek, pokud jde o chování impedance reproduktoru. A dá se samozřejmě očekávat, že dva reproduktory v součinnosti se součástkami výhybky vyprodukují něco impedančně ještě divočejšího. Teoretické odvození pro stejně velké odporové zátěže na všech výstupech je poměrně jednoduché, pokud druhá výhybka splňuje podmínku útlumu 3 dB na dělicí frekvenci - pak je totiž její vstupní impedance kmitočtově nezávislá. Pro výpočet součástek můžeme použít tytéž vzorce jako pro výpočet dvoupásmové výhybky, musíme však počítat s tím, že při použití reproduktorů z reálného světa budeme muset hodně měřit a hodně hodnot korigovat.

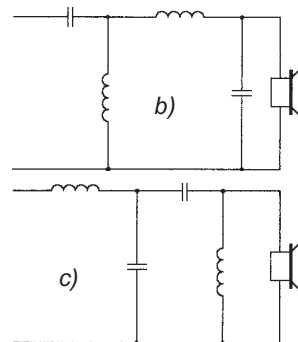
Druhá varianta řešení by se dala označit jako „hvězdicová“. Výhybka se v tomto případě skládá ze tří filtrů, jejichž vstupy jsou spojeny a tvoří tak vstup výhybky (blokové schéma na obr. 2). Soustavu filtrů tvoří dolnopropropustný filtr s mezní frekvencí odpovídající dělení basy/středy, hornopropropustný na frekvenci dělení středy/výšky, a konečně pásmový, pokrývající pásmo středů. Dolní a horní propust se dá řešit klasicky opět s použitím vzorců pro dvoupásmovou výhybku. S pásmovou propustí je to však trochu složitější. V zásadě pro její konstrukci existují dvě možnosti. První



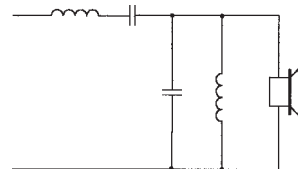
Obr. 2. Třípásmová výhybka v hvězdicovém uspořádání



Obr. 3a. Pásmový filtr pro výhybku 6 dB na oktávu



Obr. 3b,c. Kaskádní pásmové filtry pro výhybku 12 dB na oktávu



Obr. 4. Pásmový filtr pro výhybku 12 dB na oktávu odvozený ze Zobelova filtru

je tvořena kaskádním spojením dolní propust - horní propust anebo totéž v opačném pořadí. Možná uspořádání pro strmost 6 a 12 dB na oktávu jsou na obr. 3a, b, c. Součástky je opět možné počítat podle vzorců pro dvoupásmové výhybky, u varianty se strmostí 12 dB na oktávu to však většinou nedopadne nejlépe a je nutné korigovat, přičemž optimalizací kmitočtové charakteristiky obvykle dospějeme k velmi nevýhodnému průběhu kmitočtové závislosti vstupní impedance filtru i celé výhybky.

Existuje však alternativa, která je z hlediska impedančních poměrů výhodnější, a ta je znázorněna na obr. 4. Jedná se o uspořádání vycházející z klasické teorie filtrů (Zobelovy filtry). Jeho nevýhodou je pouze poněkud náročnější a hůře srozumitelná technika výpočtu (podrobnosti tentokrát vynecháme), což je asi důvodem pro to, že se příliš často nepoužívá, i když při správném návrhu jsou jeho vlastnosti jednoznačně lepší než vlastnosti kaskádního filtru.

Obecně se dá říci, že návrh třípásmové výhybky je podstatně náročnější než návrh výhybky dvoupásmové. Poskytuje sice větší prostor pro vyrovnání nedostatků reproduktorů, třípásmové řešení umožňuje dosáhnout menších zkreslení a větších zatížitelností, pro jeho optimalizaci je však potřebná důkladná znalost teorie a také hodně zkušenosti, o měřící technice nemluvě, takže - dá se na něm podstatně více zkazit.

(Pokračování příště)

# Stavíme reproduktorové soustavy (XIII)

RNDr. Bohumil Sýkora

Ve třetím díle našeho seriálu jsme se zabývali pojmem impedance reproduktoru. Brzy nato jsme si ukázali, jak vypadá elektrické náhradní schéma, které takovou impedanci realizuje a na různé záležitosti s impedancí související jsme narazili ještě několikrát. Dalo by se říci, že impedance je něco jako ta příslovečná červená nit. Její kmitočtová závislost je např. při konstrukci výhybek dosti nepříjemně rušivá, dá se z ní však vyčíst dost zajímavého o chování reproduktoru. A to je výhodné, protože kmitočtová závislost impedance, případně imedanční charakteristika, se dá snímat poměrně jednoduchou technikou. Stačí k tomu tónový generátor, nízkofrekvenční milivoltmetr a jeden trochu přesný rezistor s odporem 10 k $\Omega$ . Zapojení pro měření je na obr. 1.

Praktický postup: na generátoru nastavíme napětí 10 V, na reproduktoru měříme napětí v závislosti na kmitočtu. Absolutní hodnota impedance je tomuto napětí (skoro přesně) přímo úměrná podle zásady co milivolt, to ohm. Pokud impedance nepřesáhne 100  $\Omega$ , je systémová chyba menší než 1 %. Když průběh impedance vyneseme do grafu s logaritmickou kmitočtovou (vodorovnou) stupnicí a lineární odporovou (svislou) stupnicí, dostaneme obrázek, který jsme uvedli ve třetím díle. Uvedeme si jej však ještě jednou, a to s vyznačením některých důležitých hodnot (obr. 2). Maximální hodnotu impedance, kterou má reproduktor na rezonančním kmitočtu, označujeme  $Z_R$ . Pro další analýzu potřebujeme znát ještě stejnosměrný odpor kmitací cívky, značený  $R_S$ . Ten změříme nejlépe běžným multimetrem ve funkci ohmmetru. Pozor, různé digitální RLCmetry nejsou vhodné, měří totiž obvykle pomocí střídavého proudu na kmitočtu 100 Hz nebo 1 kHz a u reproduktorů dávají výsledky mírně řečeno problematické.

A co dále? S pomocí kalkulačky (staromilci mohou použít i logaritmické pravítko) zjistíme veličinu  $X = \sqrt{(Z_R/R_S)}$  - tedy geometrický průměr rezonanční impedance a stejnosměrného odporu kmitačky. Prohlédneme-li si blíže imedanční charakteristiku, zjistíme, že existují dvě frekvence v okolí rezo-

nančního kmitočtu, pro které je absolutní hodnota impedance rovna  $X$  (viz obr. 2). Tyto frekvence můžeme celkem přesně najít v měřicím zapojení. Označíme je  $f_1$  a  $f_2$ . Z nich vypočítáme pomocnou veličinu  $F$ , která je dána vzorcem  $F = \sqrt{[(f_1 \cdot f_2)/(f_1 - f_2)]}$ .

Další pomocné veličiny jsou dány vzorci  $A = \sqrt{(Z_R/R_S)}$ ,  $B = 1/A$  a  $C = A - B$ . Když to všechno máme, můžeme vypočítat tři důležité parametry reproduktoru, a to celkový činitel jakosti  $Q_T = F/A$ , mechanický činitel jakosti  $Q_M = F/B$  a elektrický činitel jakosti  $Q_E = F/C$ . Tyto parametry patří do skupiny tzv. parametrů S-T a pokud chceme mít aspoň ty základní pohromadě, potřebujeme zjistit ještě ekvivalentní objem reproduktoru (viz pátá část seriálu).

I k jeho zjištění můžeme vyjít z měření impedance podle následujícího postupu. Nejprve pomocí právě popsané metody zjistíme rezonanční kmitočet reproduktoru a jeho celkový činitel jakosti. Pak reproduktor vezmeme a vestavíme jej do uzavřené ozvučnice o známém objemu  $V_M$ . V tomto stavu opět změříme rezonanční kmitočet a činitel jakosti. Pokud je všechno v pořádku, naměříme hodnoty, které jsou oproti stavu bez ozvučnice poněkud větší, a to tak, že se obě zvětšily v přibližně stejném poměru. Poměrné zvětšení rezonanční frekvence označíme  $\varphi$ , poměrné zvětšení činitele jakosti označíme  $\theta$ . Ekvivalentní objem reproduktoru je pak dán vzorcem  $V_{EKV} = V_M/(\varphi\theta - 1)$ .

K čemu že je to všechno dobré? Hodnoty parametrů S-T bývají udávány v dokumentaci reproduktorů, ne vždy jsou to však údaje spolehlivé. A tak je dobré umět si je zjistit vlastními silami. Pokud totiž chcete sami navrhovat basovou ozvučnici, bez jejich znalostí se neobejdete přinejmenším proto, že program, který asi pro takový účel budete používat, si o ně řekne. Kromě toho se o reproduktoru dá dosti říci (nebo alespoň odhadnout) jen na základě znalostí těchto parametrů, i bez akustického měření. Už jsme se o tom zmiňovali - pokud má reproduktor celkový činitel jakosti blízký nebo větší  $\sqrt{2}$ , nehodí se příliš pro použití v basreflexu. Anebo, optimální objem uza-

vřeného ozvučnice je ten, ve kterém je činitel jakosti právě rovný  $\sqrt{2}$ , a toho je dosaženo, pokud je objem ozvučnice  $V$  zvolen podle rovnice:

$$V = V_{EKV} \cdot Q_T^2 / (2 - Q_T^2)$$

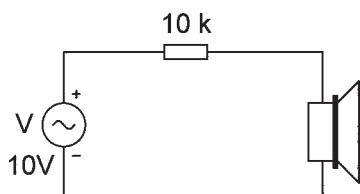
Optimální objem pro basreflexovou ozvučnici je asi tak jedenapůlkrát až dvakrát větší (to už je opravdu jen přibližně). Z parametrů S-T se dá také vypočítat citlivost reproduktoru a hodnoty součástek v náhradním schématu, avšak to už je trochu komplikovanější. Existují samozřejmě prostředky využívající výpočetní techniky, které umožňují zjistit hodnoty parametrů S-T a dalších důležitých veličin bez zdoluhavého proměřování a přepočítávání. Donedávna představovalo pořízení takového měřicího systému poměrně velkou investici.

Například měřící adaptér firmy DRA Laboratories (MLSSA) s příslušným softwarem stojí ještě dnes asi tak na 140 000 Kč. Dobrou zprávou je, že nyní je možné pořídit srovnatelně kvalitní systém podstatně levněji. Jedná se např. o Liberty Audio Suite (LAUD) - jeden z prvních profesionálních programů pracujících s běžně dostupnou (byť ne právě nejlevnější) multimediální zvukovou kartou. Software pořídíte asi za 15 000 Kč a kartu Turtle Beach - Fiji nebo Pinnacle podle konfigurace už od 21 000 Kč. Oproti systému MLSSA DRA, který je prvotně koncipován především pro profesionální aplikace v prostorové akustice, je LAUD orientován více na reproduktory (umí měřit i zkreslení) a pro území, na kterém se pohybuje náš seriál, je tedy v některých ohledech dokonce vhodnější.

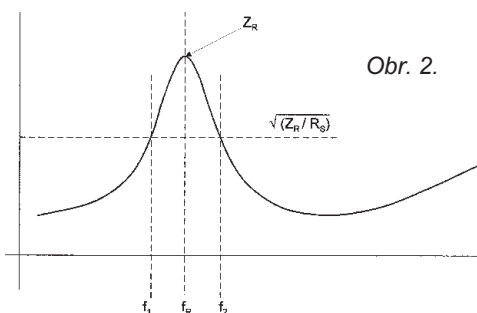
Demoverze tohoto systému a i další zajímavé programy jsou k nalezení na adrese <http://www.jjj-sat.cz>.

Jestliže vás tato poslední zpráva až tak nenadchla, nedá se nic dělat - „tůňák“ to jistí.

(Pokračování příště)



Obr. 1.



Obr. 2.

# Stavíme reproduktorové soustavy (XIV)

RNDr. Bohumil Sýkora

Jak předcházející části seriálu - aspoň doufám - ukázaly, existuje pro návrh reproduktorové soustavy docela slušný teoretický aparát, který s patřičně aplikovanou výpočetní technikou umožňuje při konstrukci postupovat bez zbytečného tápání (ukázali jsme si z něj ovšem jen dost nepatrný zlomek). Zkusíme si teď předvést, jak by takový postup mohl vypadat v praxi.

Na začátku musí vždycky být něco, co by se dalo označit jako strategický záměr. Především je nutné definovat, pro jaký účel soustavu konstruujeme - hifi, ozvučování koncertní produkce, místní rozhlas, sportovní hala? A v rámci této definice je dobré mít jasno v tom, pro jakou (samozřejmě relativní) úroveň kvality chceme konstrukci realizovat. Dejme tomu, že chceme navrhnout „hifi bednu“ poněkud vyšší kategorie s poněkud větším akustickým výkonem, tedy řekněme s maximálním akustickým tlakem 110 dB ve vzdálenosti 1 m.

Zkušenost nám říká (a teoretická analýza by to potvrdila), že z hlediska výkonu budeme potřebovat basový měnič o průměru alespoň 21 cm. Zatím se s tím spokojíme a uvažme, jakou dolní mezní frekvenci zvolíme. Za rozumný kompromis lze považovat 40 Hz pro pokles -6 dB. Dále musíme vybrat typ ozvučnice. K tomu už je zapotřebí nějaké to počítání, nejlépe s použitím PC. Pro amatérské a „polo-profesionální“ použití se hodí nějaký lehčí software CAD, například CAAD (z produkce Monacor) nebo LSP CAD, které prodává již několikrát citovaná firma Besie. V nabídce shareware najdeme i jednodušší programy, pro ob-

zvláště náročné uživatele jsou pak určeny např. programy AKABAK nebo CALSOD (pořizovací cena 10 000 Kč a více). My v tomto příkladu budeme ozvučnici řešit s použitím návrhového programu LSP CAD, který se v leckterých ohledech svými možnostmi přibližuje jmenovaným profesionálním programům.

Basový reproduktor zvolíme z databáze, kterou tento program nabízí, s ohledem na případnou dostupnost se rozhodneme pro značku SEAS a z ní můžeme vzít například měnič P21REX. Jedná se o basový reproduktor s polypropylénovou membránou, průměrem kmitačky 39 mm a maximální výchylkou  $\pm 10$  mm. Výrobce udává charakteristickou citlivost 91 dB a dlouhodobou zatížitelnost 80 W, což jde celkem dobře dohromady s naším požadavkem maximálního akustického tlaku. Činitel jakosti je 0,37, ekvivalentní objem 69 litrů a rezonanční frekvence 33 Hz, takže se pro začátek dá odhadnout, že bychom mohli vystačit s objemem ozvučnice 40 litrů. V sortimentu firmy SEAS jsou i typy s poněkud větší citlivostí, mají však menší činitel jakosti a to znamená, že u nízkých kmitočtů mohou být trochu problémy s vyrovnáním průběhu charakteristiky.

První představu o chování reproduktoru poskytne výpočet průběhu kmitočtové závislosti akustického tlaku na kmitočtu pro uzavřenou ozvučnici o objemu 40 litrů (obr. 1a); příslušná křivka je na obr. 1b (tlustá čára). Vidíme, že maximální citlivost je spíše

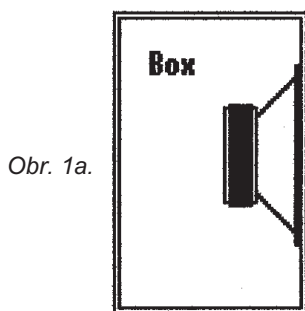
90 dB, což by nemuselo vadit. Na kmitočtu 40 Hz je však relativní pokles o 7 dB, což už je příliš. Zkusíme si tedy pomocí basreflexem o stejném objemu (obr. 2a). Charakteristika pro naladění ozvučnice na přibližně 40 Hz je na obr. 2b. Ta už vypadá podstatně lépe, pro 40 Hz je pokles jen o 3 dB. Mírné převýšení kolem 70 Hz je spíše užitečné, zvuk basových nástrojů se jím totiž „zpevní“. Dosažený výsledek je celkově velmi dobrý, další úpravy (dolaďování) má smysl provádět až na realizované ozvučnici. Potřebujeme ovšem znát rozměry basreflexového nátrubku a ty nám LSP CAD spočítá také, při kruhovém průřezu vychází průměr 7 cm a fyzická délka 11,5 cm, což je velice rozumné. Větší průměr by nebyl na škodu, vedlo by to však k větší délce nátrubku, jak vyplývá ze vzorce pro rezonanční kmitočet ozvučnice:

$$f_B = 54,6 \sqrt{S/(V \cdot l)},$$

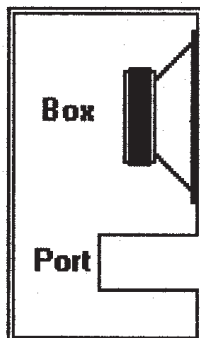
kde  $S$  je plocha otvoru nátrubku,  $V$  je objem ozvučnice a  $l$  je akustická délka nátrubku, kterou dostaneme jako součet fyzické délky nátrubku a tzv. koncové korekce. Koncová korekce závisí na provedení nátrubku a jeho průřezu, pro obvyklé uspořádání s čtvercovým nebo kruhovým průřezem je velikost koncové korekce přibližně  $0,93 \cdot \sqrt{S}$ .

Basovou sekci bychom tedy měli v prvním přiblížení hotovou. Pokud by výsledkem návrhu měla být jen samostatná basová sekce, určená pro použití třeba jako subwoofer, mohli bychom s teoretickým návrhem skončit a přikročit k experimentálnímu ověřování, mohli bychom však také uvážit, zdali případně nepoužít jiný typ ozvučnice. Pro takový účel se dosti často používají ozvučnice typu „pásmová propust“, tj. takové, u kterých reproduktor nevyzařuje přímo, nýbrž prostřednictvím akustického obvodu. To přináší své výhody i nevýhody, ale na ty se podrobněji podíváme příště.

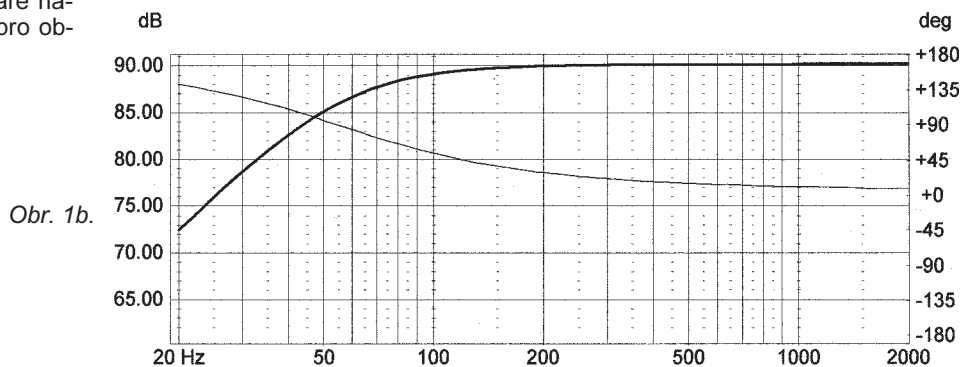
(Pokračování příště)



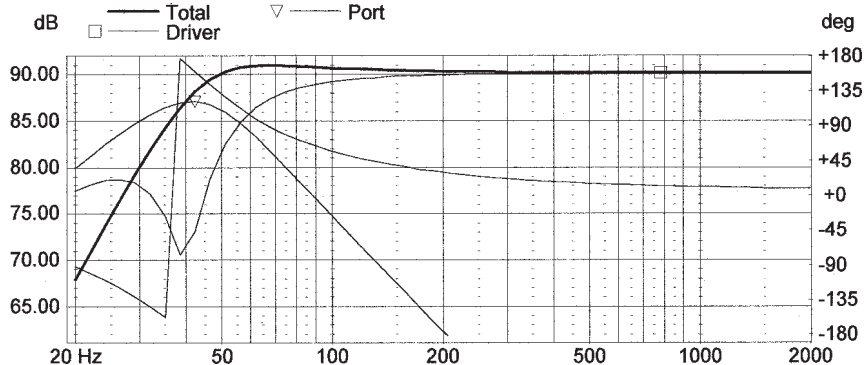
Obr. 1a.



Obr. 2a.



Obr. 1b.



Obr. 2b.

# Stavíme reproduktorové soustavy (XV)

RNDr. Bohumil Sýkora

Jak jsme přislíbili minule, zůstaneme ještě chvíli u tématu basové sekce reproduktorové soustavy. O některých specifických problémech této části „hifistického“ folklóru jsme se již dříve zmínili - jedná se především o omezení vyzářeného akustického výkonu, které je dané souvislostí mezi výkonem, výhylkou a plochou membrány a frekvencí. Maximální dosažitelná výhybka je dána konstrukčními možnostmi a u reproduktorů pro aplikace hifi je dosahováno výhybek do 15 mm - rozumí se špičková hodnota v jednom směru, čemuž odpovídá mezivrcholová hodnota (neboli „plus minus“) třicet milimetrů.

Uvážíme-li toto omezení, pak pod jistou kmitočtovou hranicí je akustický výkon reproduktoru limitován maximální výhybkou. Posunout tuto hranici k nižším kmitočtům je při ponechání maximální výhybky možné jen zvětšením plochy membrány reproduktoru, jejíž potřebná velikost je nepřímou úměrnou druhé mocnině hraničního kmitočtu. Příklad: pro snížení hraničního kmitočtu z 60 Hz na polovinu (tedy 30 Hz) je nutné plochu membrány zvětšit na čtyřnásobek. Pokud navíc chceme v oblasti nad hraničním kmitočtem zachovat citlivost (což je nutné z hlediska tepelného namáhání kmitací cívkky) a rozumný průběh kmitočtové charakteristiky, pak z dalších

souvislostí vyplývá, že rezonanční kmitočet reproduktoru musíme rovněž snížit na polovinu a ekvivalentní objem reproduktoru (tudiž i objem ozvučnice) je nutné zvětšit na osminásobek. Opět příklad: uzavřená reproduktorová soustava s citlivostí 90 dB a s dolním mezním kmitočtem 40 Hz (míněno pro pokles o 3 dB) by musela mít objem přibližně 120 litrů. Kdybychom chtěli snížit mezní kmitočet na 30 Hz a zachovat citlivost, potřebovali bychom objem 280 litrů. Tato hodnota je základním parametrem návrhu a nezávisí na parametrech reproduktoru. Na nich ovšem závisí, zdali soustava bude splňovat ostatní požadavky, což je nutné chápat tak, že v rámci návrhu musíme také najít reproduktor s patřičnými parametry (v tomto případě s ekvivalentním objemem 280 litrů, rezonanční frekvencí 22,5 Hz a činitelem jakosti 0,5).

Z uvedených příkladů je celkem jasné, že pro patřičně kvalitní reprodukci basů je nutné, aby ozvučnice měla patřičný objem, přičemž při zvyšování nároků na kvalitu se požadavky na tento objem velmi strmě zvětšují. Konstrukteři se proto snaží vymyslet různé způsoby, jak kvalitu dosáhnout při menším objemu. Jednou z možností je basreflexová ozvučnice, kterou jsme se zabývali minule. U ní je zlepšení reprodukce v požadovaném

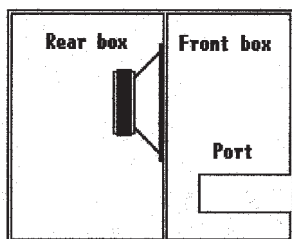
pásmu (případně zmenšení objemu) vykoupeno strmějším poklesem charakteristiky pod dolní mezní frekvenci. Je také ještě možné obětovat citlivost nad jistou hranicí, což vede k různým variantám ozvučnic typu pásmová propust.

Tři nejčastěji užívané varianty jsou na připojených obrázcích. Varianta na obr. 1a má hodně společného s basreflexem - vlastně je to basreflex, u kterého je zvuk vyzářován pouze přes rezonátor. Kmitočtová charakteristika pro optimalizované provedení se stejným reproduktorem a stejným celkovým objemem jako u basreflexu v minulé části (vypočtená opět programem LSP CAD) je na obr. 1b. V porovnání s basreflexem je poněkud menší citlivost v přenášeném pásmu, pokles pod dolní mezní frekvenci je však méně strmý. Varianta na obr. 2a z hlediska strmosti poklesu odpovídá basreflexu, její citlivost je poněkud větší (obr. 2b). Varianta na obr. 3a se chová dosti podobně (viz obr. 3b), v některých případech však může být výhodnější z hlediska realizace, protože má pouze jeden výstupní otvor.

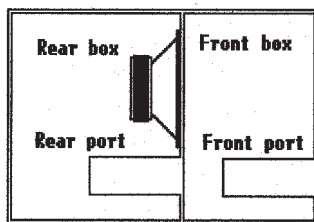
Optimalizací se v uvedených případech rozumí nastavení na pokud možno plochý průběh amplitudové charakteristiky v přenášeném pásmu. V takovém případě existuje jisté omezení pro šířku přenášeného pásma - poměr horního mezního kmitočtu k dolnímu je ve všech případech přibližně tři ku jedné. Spokojíme-li se s méně plochou charakteristikou „sedlového“ typu (dva vrcholy, uprostřed pásma je minimum), může být šířka pásma větší. Při menší šířce pásma je zase možné dosáhnout větší citlivosti, na což se často hřeší u mnoha populárních komerčních konstrukcí tzv. subwooferů.

K problematice subwooferů se ještě v budoucnu propracujeme, poznamenejme jen, že trochu problematické renomé, které tyto konstrukce mají u části „hifistické“ veřejnosti, plyne právě z většinou nevhodně voleného kompromisu mezi šířkou pásma a citlivostí.

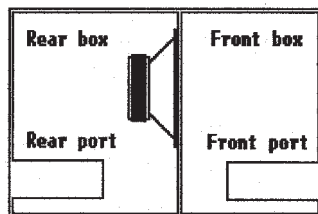
(Pokračování příště)



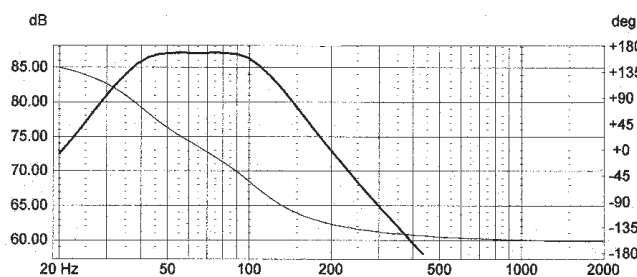
Obr. 1a.



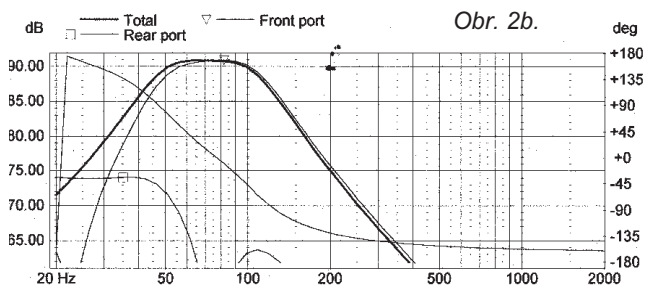
Obr. 3a.



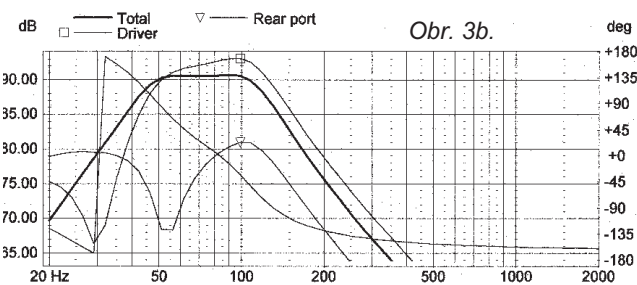
Obr. 2a.



Obr. 1b.



Obr. 2b.



Obr. 3b.

# Stavíme reproduktorové soustavy (XVI)

RNDr. Bohumil Sýkora

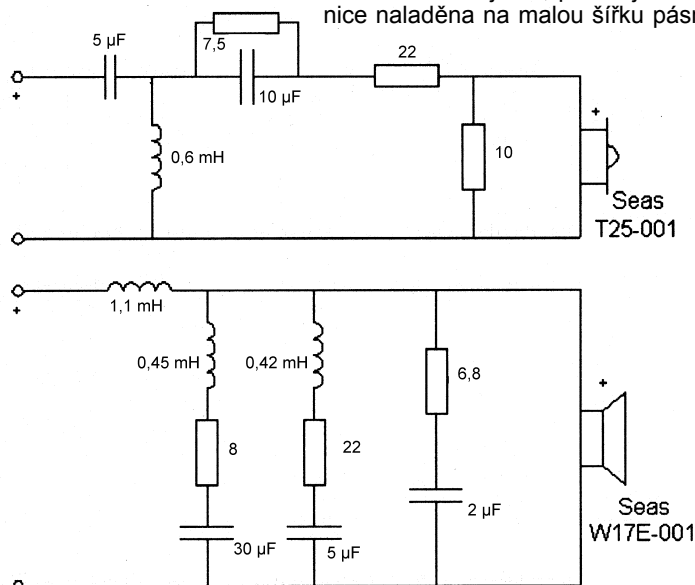
Tak tedy subwoofery. Oč se vlastně doopravdy jedná? Woofer je anglicky totéž, co v českém slangu „basák“. Zpravidla se tím rozumí reproduktor samotný, tedy měnič. Subwoofer (čti sabvúfr) je tedy něco, co je ještě pod „basákem“, pochopitelně z hlediska kmitočtového. Tedy něco, co hraje ještě nižší kmitočty než (obvyklý) „basák“. Takhle nějak to původně skutečně bylo. Jak jsme si již řekli, s reprodukcí nízkých kmitočtů jsou problémy, protože je k tomu zapotřebí bedna tím větší, čím nižší kmitočty mají být zpracovány. Rozumná hranice je někde v rozmezí 40 až 50 Hz, pro nižší kmitočty už bývá zapotřebí objem od 100 litrů výše. Hudební signál ovšem obsahuje i kmitočty pod uvedenou hranici, například nejnižší základní frekvence koncertního kontrabasů je zhruba 32 Hz, nejdelší varhanní píšťala má frekvenci přibližně 16 Hz. Ve spektru bicích nástrojů jsou rovněž významně zastoupeny kmitočty pod hranicí 40 Hz. Signály takto nízkých kmitočtů sice nejsou příliš dobře slyšitelné, protože ucho je v této oblasti málo citlivé, jejich přítomnost v celkovém zvuku je nicméně významná. Aby se vykompenzovaly nedostatky reprodukce v oblasti nejnižších kmitočtů, byly konstruovány speciální soustavy pro tuto oblast, které měly sloužit jako doplněk jinak kvalitních reproduktorových soustav pro zbytek pásma, tedy zhruba od 40 až 50 Hz výše.

Tak vznikl subwoofer, realizovaný buďto jako aktivní soustava, tedy s vestavěným zesilovačem, anebo jako soustava pasivní, napájená ovšem zvláštním zesilovačem přes elektronickou výhybku. Vzhledem k tomu, že schopnost sluchového orgánu lokalizovat zdroj zvuku je na nejnižších kmi-

točtech velmi omezená a v reálných poslechovejích podmínkách lokalizaci dále zhoršují stojaté vlny, není bezpodmínečně nutné, aby umístění subwooferu odpovídalo umístění hlavní reproduktorové soustavy. A vlastně ani není nutné, aby při stereofonním uspořádání subwoofery byly dva.

Takhle to tedy začalo a v původní podobě byly subwoofery záležitostí jen pro ty největší nadšence. Postupem času si však výrobci reproduktorových soustav uvědomili, že by vlastně mohlo být obchodně výhodné, kdyby se této koncepcí tak trochu zneužilo. Když se základní soustavy navrhnu na vyšší dolní mezní frekvenci, bude nedostatek i „normálních“ basů. To se však může „dohonit“ společnou bednou pro nižší kmitočty, už to sice nebude subwoofer v pravém slova smyslu, ale říkat tomu tak budeme pořád, aby zákazník měl dojem, že dostává něco navíc. Došlo to nakonec tak daleko, že „hlavní“ bedny (neboli satelity) mají dolní mezní frekvenci třeba 100 Hz nebo i vyšší a subwoofery se reprodukuje dosti podstatná část hudebního basu.

Tady už samozřejmě výchozí předpoklady tak docela neplatí, ucho se však dá osidit, takže výsledek stále ještě může být přijatelný. Předpoklad však je, aby celý systém měl aspoň jakž takž vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku. To ovšem znamená, že na objem subwooferu jsou kladeny zhruba stejné požadavky, jaké by jinak byly kladeny na normální reproduktorové soustavy. Takové řešení samozřejmě není příliš atraktivní, a tak se v šizení pokračuje dál. Zmínili jsme se o tom, že u reproduktorových soustav typu pásmová propust je možné dosáhnout velké citlivosti i při relativně malém objemu, pokud je ozvučnice naladěna na malou šířku pásma.



Obr. 1.

A tak se dostáváme k aktuálnímu provedení systému satelity + subwoofer. Satelity jsou miniaturní krabičky, které hrají od 150 Hz výše, subwoofer duní na kmitočtu 90 Hz v šířce pásma stěží třetina oktávy a výsledný zvuk je - no, možná pořád lepší než z minivěže, avšak do hifi má hodně daleko.

Opravdové - nebo alespoň skoro opravdové - subwoofery se však přece jen občas vyskytnou, jejich oblast uplatnění je ale poněkud odlišná než klasické hifi. Jejich použití je totiž účelné v sestavách pro domácí kina. Filmový zvuk (zejména v akčních filmech) je zpravidla dosti bohatý na zvukové efekty s velkým obsahem velmi nízkých kmitočtů, které se běžnými reproduktorovými soustavami zpracovávají obtížně, a tady může být subwoofer dobrou pomůckou. Ne že by to bez něj nešlo, avšak menší soustavy se v okolí televizoru umístí snáze, subwoofer se strčí pod televizor nebo někde do kouta a je hotovo. Nové systémy pro kódování vícekanalového zvuku už s tím předem počítají a přenášejí samostatný kanál pro nejnižší kmitočty. Toto uspořádání se pro zvětšení efektivity reprodukce používá i v normálních kinech, i když reproduktorové soustavy pro kina mívají objem dosti veliký a mohou tudíž reprodukovat i hodně nízké kmitočty celkem bez problémů.

Abychom se zase jednou trochu více přiblížili k praxi, přinášíme další zapojení (obr. 1), tentokrát na soustavu, která se bez „takysubwoofereů“ zcela určitě obejde. Konstrukčně vychází ze soustavy EMBLA, kterou jsme uvedli před časem. Obsahuje však reproduktory firmy SEAS z exkluzivní řady EXCEL. Basové měniče v této řadě jsou z hlediska přenosu nízkých kmitočtů optimalizovány velmi dobře. To je dáno hlavně mohutným magnetem, velkou délkou kmitací cívky a membránou z velmi tuhého materiálu (v tomto případě na bázi skelného vlákna).

Na rozdíl od běžného provedení nemají tyto měniče středovou krycí kopolku na membráně. Namísto toho je střední část magnetického obvodu opatřena aerodynamicky tvarovaným nástavcem, vyčnívajícím uprostřed membrány. Toto uspořádání používá více výrobců, pouze firma SEAS však u řady EXCEL nástavec vyrábí z mědi. Tím se mimo jiné také zlepšuje odvod tepla z kmitací cívky. Provedení bez středové kopolky má ještě jednu výhodu - při pohybu membrány se nemění tlak pod kopolkou, jehož změny by se musely vyrovnávat prouděním vzduchu v mezeře magnetického obvodu (proto je často magnetický obvod opatřen středovým kanálkem). Toto proudění má při větších výchylkách turbulentní charakter, čímž vznikají rušivé zvuky a zkreslení - to vše u otevřeného systému odpadá a reprodukce nejnižších kmitočtů je výrazně „čistší“.

(Příště se začneme zabývat reprodukcí pásma středních kmitočtů všeobecně, samozřejmě tedy také středotónovými reproduktory.)

# Stavíme reproduktorové soustavy (XVII)

**RNDr. Bohumil Sýkora**

V hifistickém pravěku (který u nás připadá asi tak na konec padesátých a začátek šedesátých let tohoto století) bylo základním úkolem konstruktéra reproduktorových soustav navrhnout „bednu“ tak, aby uměla hrát od co nejnižších do co nejvyšších kmitočtů.

Hranice účelnosti přitom byly dány několika dost principiálně odlišnými faktory. Především díky omezené kvalitě mikrofonů, záznamových médií a výstupních transformátorů (bez kterých se tehdejší zesilovače téměř neobešly) končila oblast užitečných signálů někde mezi 10 až 15 kHz. A z obdobných důvodů začínala někde mezi 50 až 100 Hz. Tehdejší omezené možnosti technologie výroby reproduktorů prakticky vylučovaly, aby se signály z okolí dolní hranice podařilo reprodukovat při objemu ozvučnice menším než zhruba 100 litrů. K tomu byly samozřejmě nutné měniče o patřičném průměru membrány. A přijatelná reprodukce nejvyšších kmitočtů i s uvedenými omezeními byla zase možná jen při použití reproduktorů s extrémně malou kónusovou membránou nebo tlakových reproduktorů (leckdo z čtenářů možná ještě pamatuje např. miniaturní vysokotónové eliptické reproduktory TESLA ARV 081 nebo „trumpetky“ ART 281). Skutečně kvalitní reproduktorová soustava tedy musela být nevyhnutelně konstruována alespoň jako třípásmová, přičemž pro pásmo středních kmitočtů bylo obvyklé použít některý tzv. univerzální reproduktor.

Tak trochu technickou revoluci znamenal v polovině padesátých let vznik konstrukce reproduktoru označované jako „akustický závěs“. Rozumí se tím provedení reproduktoru s velmi velkou mechanickou poddajností závěsu membrány, u kterého je chování v oblasti nejnižších kmitočtů kontrolováno převážně reakcí vzduchu v ozvučnici - tedy vlastně to, co je dnes považováno za standard.

Obdobnou „revoluci“ v reprodukci nejvyšších kmitočtů znamenalo široké komerční využití konstrukce reproduktoru s membránou tvaru kulového vrchlíku. Toto uspořádání bylo původně vytvořeno pro tlakové budiče nepřímo vyzařujících reproduktorů (se zvukovody), po jistých konstrukčních úpravách a při použití vhodných materiálů se však prosadilo i v přímovyzařujícím provedení a dnes je rovněž standardem.

S basy a výškami si tedy konstruktéři vyhráli, reprodukce středních kmitočtů však dlouho zůstávala spíše na okraji jejich zájmu. Uplatňovala se zásada - na středy použij to, co se nehodí na basy ani na výšky, stačí, když zůstaneš v jisté rozumné toleranci. S rostoucí kvalitou snímací a záznamové technologie ovšem rostly i nároky na kvalitu onoho posledního a přislovečně nejslabšího článku záznamové reprodukčního řetězu, tedy reproduktorů (reproduktorových soustav), a v jisté etapě vývoje šířka přenášeného pásma (od kolika do kolika hertzů, plus minus kolik decibelů) přestala být jediným rozhodujícím faktorem kvality.

Praxe totiž ukázala, že lidský sluch je velmi citlivý na deformaci barvy zvuku, způsobenou změnou poměrného zastoupení harmonických složek přirozených signálů v oblasti středních kmitočtů, přičemž nejkritičtější je rozmezí přibližně 400 Hz až 4 kHz. Takové deformace jsou samozřejmě způsobeny hlavně kmitočtovou závislostí citlivosti reproduktoru, velmi zjednodušeně tedy nerovností amplitudové charakteristiky, významnou roli však může hrát i nelineární zkreslení. A tak se konstruktéři začali vážně zabývat optimalizací konstrukce reproduktorů z hlediska reprodukce středních kmitočtů.

Základní technické požadavky na konstrukci středotónového reproduktoru nejsou nijak přísné. Maximální potřebné výchylky nepřesahují 1 mm, takže kmitací cívka nemusí být příliš dlouhá, využití magnetického pole je dobré a nejsou tedy problémy s dosažením patřičné citlivosti. Určité potíže mohou být s průměrem membrány. Středotónový reproduktor by pokud možno neměl být příliš směrový. Kulová membrána se začíná chovat jako směrový zářič nad tzv. kritickým kmitočtem membrány  $f_k$ , který je dán přibližně vzorcem:

$$f_k = 155/D,$$

kde  $D$  je průměr membrány v metrech. Pokud bychom stanovili horní mezní kmitočet pásma středů např. 3 kHz, znamenalo by to, že průměr membrány by neměl být větší než přibližně 5,2 cm.

Středotónové reproduktory splňující tuto podmínku se skutečně vyrábějí, zpravidla v provedení s membránou tvaru kulového vrchlíku - typické jsou třeba středové „kaloty“ o průměru 38 mm. Zde však narážíme na jiný problém. Rezonanční kmitočet měniče by měl ležet pod přenášeným pás-

mem, a s ohledem na konstrukci výhybky by pokud možno neměl být vyšší než polovina dělicího kmitočtu, což znamená, že by měl být nanejvýš asi tak 200 Hz. To je u vrchlíkových konstrukcí z technologických důvodů velmi obtížné dodržet, a proto se středotónové měniče v tomto provedení používají buďto u vícepásmových soustav, anebo v kombinaci s basovým měničem spíše menšího průměru.

U třípásmových konstrukcí s průměrem basového měniče 20 cm a více je účelnější použít středotónový měnič s kuželovou membránou. Takové měniče se běžně vyrábějí s vnějším průměrem od 11 cm, čemuž odpovídá efektivní průměr membrány (po odečtení montážní části koše a neaktivní části okrajového závěsu) asi 7 až 8 cm, a to je ještě docela přijatelné. Jejich vlastní rezonanční frekvence obvykle nepřesahuje 150 Hz. Prakticky dosahovaná hodnota je samozřejmě větší, protože středotónový měnič je nutné opatřit samostatným krytem (vlastně malou uzavřenou ozvučnicí o objemu zpravidla 1 až 3 litry), aby na jeho membránu nepůsobily změny tlaku v ozvučnici způsobené činností basového měniče. Ani po zakrytí však rezonanční kmitočet většinou nepřesáhne 200 Hz, takže je vše v pořádku.

Při dimenzování středotónového reproduktoru se setkáváme ještě s jedním problémem, o kterém se běžně nemluví. Statistické analýzy přirozených signálů ukazují, že akustická energie vyzařovaná v středotónovém pásmu je přibližně stejně velká jako energie v pásmu hlubokotónovém. Pro každý konkrétní vzorek signálu je možné najít kmitočet, který z hlediska dlouhodobého průměru vyzářené energie tvoří v pásmu slyšitelných kmitočtů cosi jako těžiště - energie vyzařovaná pod tímto kmitočtem je rovna energii vyzařované nad ním. Konkrétní hodnota závisí na charakteru zvukového signálu a pohybuje se přibližně v rozmezí 200 až 600 Hz. Menší hodnoty nacházíme pro rockovou hudbu, jazz a pop, větší pak pro hudbu „vážnou“. Většina elektrické energie přivedená do soustavy se mění v teplo a z hlediska konstrukce reproduktorové soustavy to znamená, že tepelná výkonová zatížitelnost středotónové části by měla být přibližně stejná jako zatížitelnost části hlubokotónové.

Basové reproduktory však mají obecně zatížitelnost větší nežli reproduktory středotónové, takže tuto podmínku zpravidla není možné splnit. Z toho pak vyplývá, že celková dlouhodobá zatížitelnost třípásmové reproduktorové soustavy je z hlediska tepelného namáhání reproduktorů omezena především zatížitelností středotónové části.

*(Pokračování příště - Barva středů)*



# Stavíme reproduktorové soustavy (XVIII)

RNDr. Bohumil Sýkora

Minule jsme se začali zabývat problémy okolo reprodukce zvuku z hlediska barvy. Samotný pojem barvy zvuku je poněkud problematický, vychází z analogie k vidění a vlastně vůbec není přesně definován. Ve skutečnosti zahrnuje velmi široký rozsah atributů zvukového signálu souvisejících s tím, co se z fyzikálního hlediska ne zcela korektně označuje jako spektrální složení. Prakticky se v pojmu barvy zvuku odráží zásadní praktická schopnost člověka (a nejen člověka) rozpoznat např. kdo mluví, nezávisle na tom, co říká, který nástroj hraje, nezávisle na tom, které noty hraje, zvláště dobře cvičení odborníci dokáží identifikovat i konkrétní exemplář (které housle právě hrají) a podobně. Jedním ze základních kritérií kvality reprodukce je pak to, do jaké míry je individualita zdroje zvuku zachována, přičemž z tohoto hlediska mohou být tolerovány i dosti hrubé nedostatky typu ztráty výšek, basů nebo obojího.

Jak jsme si již řekli, technicky se jedná o zachování proporcionality „spektrálních složek“ především v oblasti středů. Bohužel, dynamický reproduktor běžné konstrukce je po této stránce velmi nedokonalé zařízení. Výchozí úvahy na téma fyzikální funkce reproduktoru předpokládají, že membrána se chová jako ideálně tuhá, přitom však pokud možno nehmotná deska (popř. kužel nebo něco podobného). Kdyby tomu tak skutečně bylo, žádný problém s barvou středů by nás netrápil. Skutečná membrána je ovšem hmotná a poddajná, a to je ten problém. Podívejme se, co se děje, když se kmitací cívka pokusí uvést membránu do pohybu. V místě spoje s membránou začne působit síla, která by nehmotnou tuhou membránu rozhýbala jako celek. Skutečná membrána se

však začne místo toho jenom deformovat - ohýbat. Deformace se postupně šíří, děje se tak ale konečnou rychlostí v důsledku setrvačnosti membrány. V době, kdy se kmitací cívka začne pohybovat nazpět, postupila deformace o kousek dál a v místě spoje s cívkou se začíná membrána deformovat opačným směrem. A tak dále, jak to naznačují obr. 1a až d. Po membráně se tedy šíří postupná ohybová vlna. Co je důsledkem? Různé body membrány kmitají a tudíž i vyzářují s různou fází, jejich vyzářování se v prostoru sčítá velmi složitým způsobem, fázové vztahy závisí na kmitočtu a na kmitočtu tak začíná velmi silně záviset i výsledný akustický tlak.

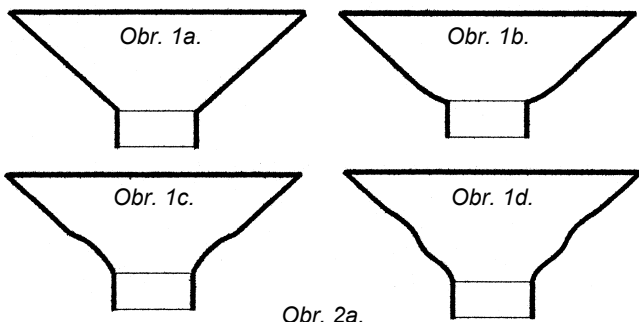
Situace se dále komplikuje tím, že postupující ohybová vlna se odráží od okraje membrány, vrací se zpět, odráží se od spoje s kmitačkou... a tak dále, takže na membráně vznikají stojaté vlny, které pro jisté kmitočty vykazují cosi jako rezonance (tzv. vlastní ohybové módy), pro něž se na kmitočtové charakteristice objevují obzvláště výrazná zvlnění. Zajímavé je, že výskyt těchto módů se projevuje i na impedanční charakteristice, což je dobře patrné z obr. 2a až c. Na obr. 2a je celková modulová charakteristika impedance jistého „obyčejného“ reproduktoru, na obr. 2b je zvětšený úsek středních kmitočtů a na obr. 2c je fázová charakteristika impedance v tomto úseku (pozor - jedná se o fázový úhel komplexní impedance, což je něco zcela jiného než fázová charakteristika vyzářování reproduktoru). Viditelné kudrlinky odpovídají výskytu vlastních módů. Setkal jsem se dokonce kdysi s reproduktorem, u kterého zvlnění impedanční charakteristiky bylo

tak výrazné, že posunulo dělicí frekvenci výhybky skoro o oktávu.

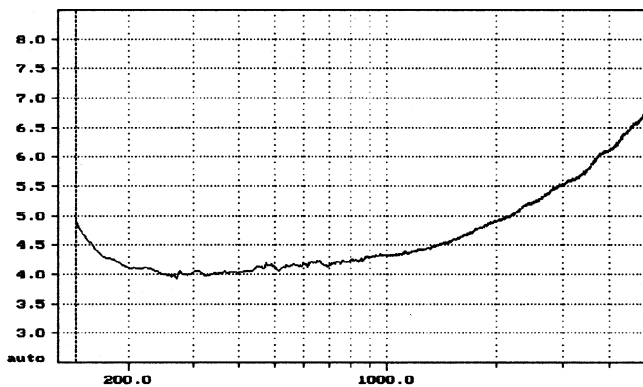
Zásadním problémem konstrukce reproduktoru určeného pro reprodukci středních kmitočtů (což nemusí být jen speciální „středák“, avšak platí to i pro basový reproduktor v dvoupásmové kombinaci) je tedy likvidace vlivu ohybových kmitů membrány na vyzářování. Uplně se tento vliv vyloučit nedá, je však tím menší, čím je membrána tužší. Vliv vlastních módů se omezí tím, že se tyto módy jednak zatlumí použitím vhodného materiálu, případně vhodným nátěrem či impregnací, a dále tím, že se příslušné kmitočty posunou mimo pracovní pásmo reproduktoru. To je opět věc materiálu - tyto kmitočty jsou tím vyšší, čím je materiál lehčí a tužší. To vede konstruktéry k používání různých kompozitních „exotičností“ typu uhlíková vlákna, kevlar, kovová pěna a podobně. Tyto materiály jsou samozřejmě drahé a to se projevuje na ceně reproduktorů. Jelikož kmitočty vlastních módů jsou tím nižší, čím je větší průměr membrány, jsou uvedené problémy obzvláště nepříjemné u dvoupásmových konstrukcí reproduktorových soustav, kdy „středý vyzářuje basák“, který, jak známo, nemůže být libovolně malý. Opravdu kvalitní basový měnič vhodný pro dvoupásmovou soustavu může mít cenu větší, než je součet ceny slušné kombinace „basák“ + „středák“ pro trojpásmovou kombinaci. Tento fakt na základě jakéhosi myšlenkového zvratu podpořil u některých skalních „hifistů“ vžitě přesvědčení, že dvoupásmová soustava je nutně lepší než třípásmová, zejména pak když je hodně drahá (ono to přesvědčení není tak docela neopodstatněné, ovšem ze zcela jiných důvodů). Na to samozřejmě hřeší výrobci reproduktorových soustav, avšak to je problém pro jiné pokračování našeho seriálu. Shrnuo, podtrženo, není jednoduché zkonstruovat opravdu kvalitní středotónový reproduktor. Rozhodně je to však menší problém než zkonstruovat basový reproduktor vhodný i pro „středý“.

(Pokračování příště - a co výšky?)

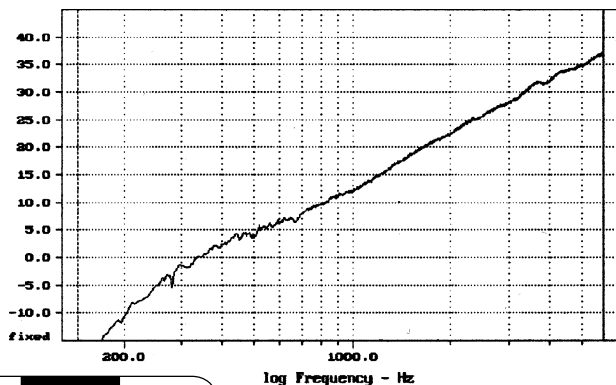
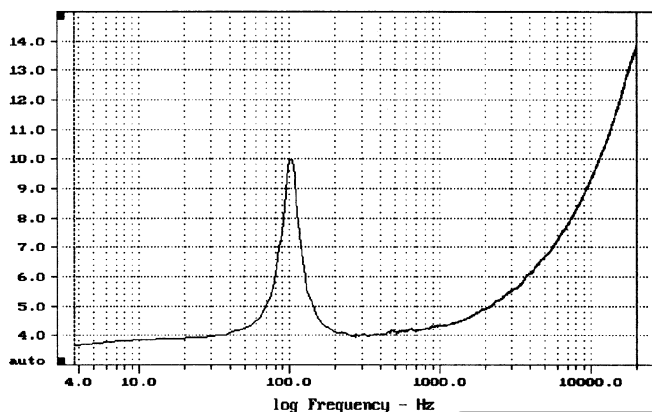
Obr. 2b.



Obr. 2a.



Obr. 2c.



# Stavíme reproduktorové soustavy (XIX)

**RNDr. Bohumil Sýkora**

Základní fyzikálně technologický problém konstrukce vysokotónového reproduktoru je v podstatě stejný jako u reproduktoru středotónového. Konečná tuhost a nenulová hmotnost materiálu vedou k tomu, že membrána není buzena synchronně nebo soufázově, avšak šíří se po ní ohybová vlna. S ohledem na vyšší vyzařované kmitočty jsou rozměry membrány menší a příslušné frekvence vlastních módů vyšší. Ideální by bylo, kdyby se je podařilo posunout nad hranici slyšitelného pásma, to je však velmi obtížné. Konstrukterům zde naštěstí hraje do rukou fyzikální zákonitosti, které určují rychlost postupu ohybové vlny po membráně. Ta se totiž s kmitočtem zvětšuje (i když zdaleka ne lineárně) a kmitočty vlastních módů se tím také zvyšují, takže problém vlastních kmitů se u vysokotónových reproduktorů do jisté míry řeší sám.

Rychlost ohybové vlny roste také s modulem pružnosti materiálu, takže je výhodné používat co nejtvrďší materiály. To je důvod k aplikaci např. titanu, případně různých povlaků, z nichž asi nejexotičtější je plazmaticky napařšený diamant. Membrány se v některých speciálních případech vyrábějí z berylia, jehož nevýhodou je však značná jedovatost, provádí se boridování a nitridování a existují dokonce membrány z korundové keramiky. Technologie realizující takové struktury jsou dosti šité a tomu odpovídají i ceny příslušných měničů.

V současné době se z kovových materiálů používá hliník nebo speciální hliníkové slitiny, ošetřené případně anodickou oxidací, čímž se vytvoří tenký korundový povlak (známé zlatavé kaloty Tannoy nebo Bowers & Wilkins). Dalším úspěšně aplikovaným materiálem je titan, vylepšený případně opět oxidovou vrstvou, jak se to dělá u firmy Focal. Nevýhodou titanu je jeho poněkud větší hustota, rychlost vlny je totiž tím vyšší, čím je materiál lehčí (proto bór, berylium apod.). Proto je nutné používat tenčí fólie (u hliníkových slitin je typická tloušťka 0,05 mm). Další cestou je použít kompozitní materiály na bázi zpevněných vláken - vlastně jde o něco jako laminát. Základním materiálem jsou nejčastěji uhlíková nebo kevlarová vlákna.

Ani seberafinovanější materiálová technologie nemusí zaručit, že vysokotónový reproduktor bude fungovat

jaksepatří. Existují ještě dvě další možnosti, jak jeho vlastnosti upravit.

První je vhodné tvarování membrány. Nejčastější je dnes konstrukce s membránou tvaru kulového vrchlíku obráceného ven, tj. vypuklého, méně často pak vydutého, mechanicky buzeného kmitací cívkou upevněnou na obvodě membrány. Hlavní výhodou kulového tvaru je jeho snadná realizovatelnost; z fyzikálního hlediska by byly výhodnější jiné tvary, které by se však podstatně hůře vyráběly. Klenutí materiál ohybově zpevní, takže vlastní frekvence ohybových vln se posunou opět poněkud výše. Druhou možností je zbavit se ohybových rezonancí vhodným zatlumením. To se děje u membrán z textilu a měkkých plastů. Zde tlumení (zejména u vyšších frekvencí) může být tak dokonalé, že se ohybová vlna zatluhmí hned u spoje kmitačky s membránou a zvuková vlna je vyzařována prakticky jen úzkým mezikružím v blízkosti okraje membrány. To v podstatě není nijak na závadu, směrové vyzařovací vlastnosti mezikruží mohou být za jistých okolností dokonce ještě výhodnější než vlastnosti „tvrdých membrán“. I když totiž vlastní kmitočty posuneme nad hranici slyšitelného pásma, zbývá zde jeden problém.

Ohybová vlna se (u běžné vrchlíkové konstrukce) šíří konečnou rychlostí od okraje membrány ke středu, takže střed membrány vyzařuje s jistým fázovým zpožděním. Pro ilustraci: rychlost ohybové vlny na hliníkové fólii o tloušťce 0,05 mm při kmitočtu 20 kHz je asi 172 m/s, tedy zhruba polovinu rychlosti zvuku ve vzduchu (a pro zajímavost, sklo, ačkoli se zdá v porovnání s hliníkem velmi tvrdé, má z hlediska šíření ohybové vlny téměř stejné vlastnosti). Výsledná prostorová interference má za následek plynule se zmenšující citlivost směrem k nejvyšším kmitočtům - obvykle od hranice asi 12 kHz. Tento problém u vyzařování mezikruží odpadá, samozřejmě je však nahrazen jinými problémy, takže pro vysokotónové reproduktory s měkkou membránou bývá typické výrazné zvlnění charakteristiky, popř. pokles citlivosti v pásmu 15 až 20 kHz, přičemž pod 15 kHz je vše celkem v pořádku. Problém prostorové interference u reproduktorů s tvrdými (kovovými) membránami se obvykle aspoň zčásti řeší umístěním různých difuzorů nebo fázových kompenzátorů před membránou, což může pracovat

docela dobře a zdařilě konstrukce (např. SEAS nebo Focal) se vyznačují vyrovnanou osovou charakteristikou a poměrně širokým vyzařovacím úhlem.

Ještě jedna poznámka k tématu předchozího dílu. I u středotónových reproduktorů platí všechny popsané mechanismy, i zde se používají exotické skladby materiálu, zásadní rozdíl je snad jen v tom, že středotónové reproduktory se budí u středu membrány a ohybová vlna se šíří - ba přímo rozšiřuje - směrem k okraji. Pokud se podaří dosáhnout postupného utlumení ohybové vlny, potom se v oblasti vyšších kmitočtů pohybuje jen menší část membrány v blízkosti středu - průměr vyzařující plochy vlastně jako by se směrem k vyšším kmitočtům zmenšoval. To je samozřejmě příznivé, poněvadž vyzařování reproduktorů pak z hlediska citlivosti, případně vyzářeného výkonu, není striktně omezeno kritickou frekvencí, určenou geometrickým průměrem membrány.

Na funkci vysokotónového reproduktoru má velmi významný vliv způsob, jakým je vestavěn do ozvučnice. Nejlepší je, když je reproduktor zapuštěn tak, aby s čelní deskou ozvučnice tvořil pokud možno hladkou plochu. Jakékoli vystouplé či propadlé okraje se v důsledku zákonitostí šíření vln stávají zdrojem sekundárního vyzařování (odrazy, difrakce, reradiace), a příslušné signály se od primárního signálu fázově liší. To vede ke zvlnění kmitočtové charakteristiky, které může být omezeno jen na úzkou oblast v okolí osy reproduktoru a v tom případě bývá značně výrazné (setkal jsem se se zvlněním větším než 10 dB), může však být prostorově ohraničené méně výrazně.

Obdobný efekt nastává na hranách přední desky ozvučnice, zasahuje většinou i do oblasti středů (obvykle od 1 kHz výše) a je důvodem, proč se tyto hrany zaoblují, zkosují apod. Ze zkušenosti mohu říci, že pokud jsou k dispozici skutečně kvalitní měniče, pak hlavním problémem optimalizace reproduktorové soustavy je volba vhodného tvaru ozvučnice. Návrh výhybky, dimenzování basreflexu apod. jsou až na dalších místech.

A jak je to s barvou zvuku? Výšky musí být, je to ta pověstná třešnička na dortu či poprašek cukru na koblize. Nemají už takový vliv na individualitu složek zvuku, bez nich je však zvuk „tupý“ a nevyrazný. Oblast kolem 4 kHz dává „jasnost“, kolem 8 kHz se utváří „ostrost“ a kolem 16 kHz jsou ty složky, které určují, zda zvuk bude vnímán jako „stříbrný“, „hedvábný“ apod. Charakter průběhu by měl být vyrovnaný, bez zlomů, propadů či „hrbů“, povlnový a plynulý vzestup od hranice 10 kHz výše je obvykle vnímán pozitivně. Bohužel, i zde často platí, že nejslabším článkem řetězu může být nahrávka.

*(Pokračování příště - Jak na bednu)*