

# Stavíme reproduktorové soustavy (I)

RNDr. Bohumil Sýkora

Radioamatérské aktivity v oblasti spotřební či zábavní elektroniky jsou ve značném útlumu. Je to zcela pochopitelné vzhledem k dostupnosti příslušného zboží v obchodní síti. Časy stavby tunerů se soustředěnou selektivitou asi nenávratně minuly, analogové gramofony již také nejsou ve středu zájmu a do samovýroby přehrávače CD se duševně zdravý člověk těžko pustí, pokud by neměl v úmyslu časem přejít na malosériovou výrobu nějakého toho high-endového úletu. Podomácké výrobě dostupné zůstávají prakticky jen zesilovače a reproduktorové soustavy. Klasikové konstrukcí zesilovačů v českých luzích a hájích své myšlenky po trpkých obchodních zkušenostech nepublikují. Jistá poptávka po stovebních návodech však přece jen zůstává, zdá se, že bastlíři ještě nevymlřeli.

Zde je tedy pomocná ruka alespoň pro ty, kteří neváhají obětovat něco ze svého volného času stavbě reproduktorových soustav. Stejně jako pro nadšence v jiných oborech i pro ně platí, že peněz vlastní stavbou takového zařízení příliš mnoho neušetří. Ale konec konců, pro peníze to jistě nedělají. Pocit hrdosti nad produktem vlastního úsilí se penězi vyvážit nedá. A to tím spíše, když takový produkt funguje alespoň srovnatelně s výrobkem profesionálním. Náš seriálek bude zaměřen hlavně na to, aby cesta k takovému produktu nebyla doprovázena přílišným tvůrčím tápáním a aby výsledek byl alespoň trochu přiměřený míře úsilí, na jeho dosažení vynaloženého. Pokud by se někdo chtěl touto problematikou zabývat hlouběji a podrobněji, udělá nejlépe, chopí-li se patřičné odborné literatury, jejíž přehled bude uveden v závěru seriálu (viz např. AR-B 5/93).

O konstrukci reproduktorových soustav, o zákonitostech jejich funkce a možných úskalích jejich stavby toho bylo napsáno poměrně dost, a to i na stránkách tuzemských časopisů pro radioamatéry. Přesto ale bude užitečné nejprve si něco na toto téma zopakovat. Jak známo, nejdůležitější součástí každé reproduktorové soustavy je reproduktor, anebo častěji reproduktory. Občas vznikají nedorozumění v terminologii, neboť anglické slovo Loudspeaker a německé Lautsprecher označují reproduktorovou soustavu jako celek a pro reproduktor jako jednotlivý elektroakustický měnič se užívá označení (Loud-speaker) Driver nebo (Lautsprecher) Chassis. České názvosloví je možná trochu neohrabané, nechce se mi ale používat názvu reprobedna a tak zůstaneme u oficiálních zvyklostí.

Reproduktor (tedy to, co se označuje jako měnič, ale i soustava jako celek) je zařízení k přeměně elektrické energie na zvuk. Účinnost této přeměny je velice malá, takže většina elektřiny se mění v teplo. Z toho plyne první základní poučení:

Reproduktory jsou vlastně topná tělesa, vedlejším produktem jejich činnosti je zvuk.

Energetická účinnost produkce zvuku může být vyjádřena procenty, jak je to obvyklé v technice všeobecně, u reproduktorů se ale častěji používá tzv. **charakteristická citlivost nebo prostě citlivost. Tato veličina udává, jaký akustický tlak vytvoří reproduktor ve vzdálenosti 1 m při zdánlivém příkonu 1 VA.** Někdy se užívá i jiná vzdálenost, to pak bývá příslušně specifikováno.

A příkon je zdánlivý proto, že reproduktor není jednoduchá zátěž odporového charakteru. Při jistém zjednodušení se dá říci, že účinnosti jedno procento odpovídá charakteristická citlivost 92 dB (1m, 1 VA), účinnosti 10% pak 102 dB. Reproduktory pro spotřební elektroniku mívají citlivost 84 až 94 dB, vysoce výkonné reproduktory pro ozvučování velkých ploch a prostorů dosahují citlivostí nad 105 dB.

Pro značně hlasitou reprodukci v bytových podmínkách potřebujeme maximální akustický tlak nejvýše 110 dB, což by pro vzdálenost jednoho metru a citlivost 90 dB (to je mimochodem u hifi soustavy hodnota velmi slušná) znamenalo elektrický příkon 100 W. To vše naštěstí platí jen pro krátkodobé špičky, které se v přirozeném signálu vyskytují řádově po dobu setin jeho celkového trvání. Dlouhodobý průměr výkonu je asi tak stokrát menší. Z toho plyne druhý základní poučení:

**Výkonové možnosti reprodukčního zařízení po naprostou většinu provozní doby využíváme asi tak z jedné setiny, zbývajících devadesát devět procent výkonu je však nutných pro věrnou reprodukci krátkodobých špiček.**

Pokud má reproduktorová soustava citlivost menší než oněch 90 dB, je pro stejný akustický tlak samozřejmě nutný vyšší příkon. To opravňuje ony několikasetwattové zesilovače do obývacího pokoje. Ty jsou ovšem svůj mohutný výkon schopny dodávat zase jen po dosti krátkou dobu a víc ani

není zapotřebí. To respektují normy, podle kterých **zesilovač má být po neomezeně dlouhou dobu schopen dodávat alespoň jednu desetinu svého jmenovitého výkonu** (viz např. doporučení IEC 268) - ale to už je jiná kapitola elektroakustiky.

Zásadním problémem, který z právě nastíněné motanice procent a wattů vyplývá, je problém výkonových údajů u reproduktorů a reproduktorových soustav. Pokud se jedná o soustavy, je situace poněkud zjednodušená doporučením (opět IEC 268). To stanoví, co je to jmenovitý příkon soustavy. Ten se především udává pro speciální testovací signál, tzv. simulovaný program, který má v dlouhodobém průměru obdobný charakter jako přirozený resp. hudební signál. Jeho příkon pro danou reproduktorovou soustavu se stanoví podle vzorce

$$P = U^2/Z$$

kde  $U$  je efektivní hodnota napětí (opět dlouhodobě průměrovaná) a  $Z$  je jmenovitá impedance soustavy. **Jmenovitý příkon je pak to, co soustava vydrží po dobu alespoň sto hodin, aniž by se její vlastnosti změnily.** Tuto hodnotu by měli závazně udávat všichni výrobci. V praxi víceméně platí, že při připojení reproduktorové soustavy o jistém jmenovitém příkonu na zesilovač o stejném jmenovitém výkonu nemůže dojít k jejímu poškození hudebním signálem, pokud zesilovač není buzen do limitace.

Výrobci ovšem z obchodních důvodů udávají ještě (a někdy jenom) různé hudební, programové, impulsní a já nevím jaké další hodnoty, které jsou podstatně vyšší než hodnota jmenovitá. Ty buďto nemají žádnou přesnou definici anebo si tuto definici výrobce stanoví podle svých vlastních potřeb. Při jejich udávání se v lepším případě vychází z charakteru přirozeného signálu a impulsní přetížitelnosti měničů (což ale do značné míry respektuje již definice jmenovitého příkonu). V horším případě se hřeší na to, že málokdo může tyto údaje kontrolovat, aniž by se přitom skokově změnila parametry soustavy - ze stavu funkčního do stavu nevratného poškození. Nejošemetnější je v tomto ohledu údaj tzv. sinusového příkonu. Tento údaj ve skutečnosti slouží pouze pro potřeby zkušebních pracovišť k stanovení nejtvrděších podmínek, za kterých je možné měřit kmitočtovou charakteristiku a zkreslení a v zákaznické dokumentaci by se vůbec neměl objevit. Typické hodnoty skutečného maximálního sinusového příkonu přitom mohou být i stokrát menší než jmenovitě.

Při dodržení „pravidel slušnosti“, vycházejících z právě popsaných souvislostí, vystačíme v obvyklých bytových podmínkách s výkonem 50 až 200 W na straně zesilovače i reproduktorové soustavy. Jak a s jakými reproduktory jich dosáhneme, o tom bude řeč v dalších částech našeho seriálu.

(Pokračování příště)

# Stavíme reproduktorové soustavy (II)

RNDr. Bohumil Sýkora

V předchozí části jsme se zabývali pojmem příkonu reproduktorové soustavy. Než popojdeme dále, ujasníme si ještě jednu věc. Příkon, popř. jmenovitý příkon, reproduktorové soustavy je **maximální elektrický výkon, který do ní můžeme přivést, aniž by byla soustava poškozena nebo zkreslen signál**, a to vše za předpokladu, že jsou dodrženy podmínky, pro které je příkon definován. Nejde tedy o velikost výkonu, kterou soustava od zesilovače vyžaduje, kterou by z něj jakoby odčerpávala. Proto připojíme-li soustavu s velkým jmenovitým příkonem na zesilovač s malým jmenovitým výkonem, nezpůsobí velký příkon soustavy poškození zesilovače. Musí být ovšem dodržena zatěžovací impedance zesilovače, k čemuž se dostaneme později. Naopak se však může poškodit soustava s malým příkonem při připojení na zesilovač s velkým výkonem.

A nyní, jak je to s výkonovými a příkonovými hodnotami udávanými pro jednotlivé reproduktory. Pokud je pro jednotlivý reproduktor (tj. elektroakustický měnič) udáván příkon s přídomkem sinus nebo RMS sinus, mělo by se jednat o maximální velikost příkonu, kterou je tento měnič schopný bez poškození přeměňovat v teplo po prakticky neomezenou dobu. U basových reproduktorů pro hifi aplikace je tento příkon zpravidla desítky wattů, či správněji voltampérů. U středotónových reproduktorů této kategorie jde opět o desítky wattů, jen těch desítek bývá méně. A u vysokotónových reproduktorů je maximální sinusový příkon zpravidla nanejvýš deset wattů.

V praxi se však setkáváme spíše s údaji typu program, music a podobně, přičemž velikosti jsou podstatně větší - desítky a někdy i stovky wattů, a to i u vysokotónových reproduktorů. Jak je to možné? Hlavním důvodem je, že papír unese všechno a výkonem se často poměřuje cena (co watt, to dolar atd.). Dále, nejde o trvalé velikosti příkonu, nýbrž krátkodobé, a to stejně jako u soustav opět s definicí neznámou nebo proměnlivou od výrobce k výrobcu. Potud jde o reklamní triky.

Z technického hlediska tyto triky mohou být alespoň do jisté míry opodstatněny specifickými vlastnostmi přirozeného (tj. hlavně hudebního) signálu. Jestliže stvoříme vícepásmovou reproduktorovou soustavu s patřičnou výhybkou (viz dále) a změříme, jaká poměrná část přivedeného výkonu je nasměrována do jednotlivých větví či pásem, pak shledáme, že do basů jde zhruba polovina, do středů asi tak třetina a do výšek nejvýše šestina výkonu. Onen hudební či programový příkon nebo zatížitelnost toho kterého měniče jsou pak míněny jako **velikost, kterou je možné přivést na vstup soustavy osazené tímto měničem a vybavené patřičnou výhybkou, aniž by se měnič poškodil. To vše samozřejmě za předpokladu, že přivedený signál má charakter přirozeného signálu**, případně je nahrazen simulovaným programovým signálem (viz předchozí část). A rozumí se, že nejde o údaje trvalé, nýbrž krátkodobé, impulsní, definované podle výrobce XY, a tak dále a tak dále. On to vlastně není zas tak velký podfuk, když uvážíme, že třeba do vysokotónového pásma jde nejvýš 15 % celkového okamžitého příkonu, který po devadesát procent provozní doby nepřesahuje desetinu příkonu maximálního.

Z tohoto hlediska můžeme vysokotónový měnič s trvalým (RMS sinus) příkonem 5 VA bez obav připojit na zesilovač s výkonem 100 W. Měnič však musí být připojen přes patřičnou výhybku (solidní výrobci měničů někdy uvádějí i její doporučené zapojení) a do zesilovače musí přicházet signál s vlastnostmi signálu přirozeného, **nikoli tedy například sinusový tón 10 kHz z oblíbeného generátoru na CD**.

Všechny dosavadní úvahy do jisté míry vycházely z předpokladu, že zatížitelnost reproduktoru je omezena jeho tepelnou odolností. To platí celkem bez výhrad o vysokotónových reproduktorech a převážnou měrou o reproduktorech středotónových. U těch a zejména pak u reproduktorů basových však existují ještě omezení jiného druhu, daná spíše mechanickou konstrukcí. Jde o to, že celý kmitací systém reproduktoru je uváděn do pohybu silami, které mohou jít až na hranici pevnosti použitých materiálů. Dochází samozřejmě také k únavě materiálu (cyklické namáhání, opakovaná plastická deformace atd.).

Basové reproduktory se navíc mohou poškodit nadměrnou výhybkou. Zde bude užitečné zmínit se o jedné základní fyzikální závislosti, kterou je určen akustický výkon reproduktoru (a nejen reproduktoru). Jestliže nějaká kmitající plocha (např. membrána reproduktoru) vyzařuje sinusový signál, pak akustický výkon takto vyzářený je přímo úměrný druhé mocnině velikosti kmitající plochy, druhé mocnině její maximální výchylky a čtvrté mocnině kmitočtu vyzařovaného signálu. Dá se to vyjádřit jednoduchým vzorcem

$$P = k \cdot S^2 \cdot y^2 \cdot f^4,$$

kde S je plocha, y maximální efektivní velikost výchylky a f je kmitočet. Konstanta k obsahuje různé fyzikální veličiny, vztahující se k prostředí, ve kterém se zvuk šíří. Jestliže chceme vědět, co se v závislosti na kmitočtu děje při jistém zadaném akustickém výkonu  $P_1$  s měničem o ploše

membrány  $S_1$ , můžeme uvedený vzorec upravit do následujícího tvaru:

$$y = \sqrt{P_1} / (S_1 \cdot f^2 \cdot \sqrt{k}),$$

což vyjádřeno slovy znamená, že při konstantní ploše a konstantním výkonu je výchylka membrány nepřímo úměrná druhé mocnině kmitočtu. A to dále znamená, že směrem k nízkým kmitočtům výchylka membrány reproduktoru se musí velmi prudce zvětšovat, má-li být zachován konstantní akustický výkon. Nebo, při jisté maximální výchylce (která je dána konstrukcí reproduktoru) pod jistým kmitočtem, se prudce zmenšuje maximální dosažitelný akustický výkon. Proto se basové reproduktory konstruují tak, aby maximální výchylka membrány byla co největší, přičemž u měničů s menšími membránami je buďto větší maximální výchylka (což však není běžné), anebo menší maximální výkon (což naopak běžné je).

V technických datech těchto reproduktorů pak nacházíme velikost maximální výchylky, udávanou zpravidla jako maximální rozkmit, tedy mezivrcholovou hodnotu (špička - špička), což je u sinusového signálu  $2\sqrt{2}$  (přibližně 2,82), násobek hodnoty efektivní. Dosti často je udávána také maximální lineární výchylka, jejíž velikost je menší než absolutní maximum. Při nárůstu výchylky totiž nevzniká nějaké poškození skokem. Až do jisté velikosti výchylky se reproduktor chová jako lineární měnič a výchylka kmitacího systému je přímo úměrná napětí. Pak se tato linearita poruší, což prakticky znamená, že reproduktor začíná zkreslovat. A posléze nastane buďto „tvrdé“ omezení, kdy některá část kmitacího systému (např. kmitací cívka) začne narážet na některou pevnou část reproduktoru (např. dno magnetického systému), nebo kmitací cívka opouští magnetický systém, aby se do něj již nevrátila (tzv. „vystřelení“ kmitačky). Mohou se také utrhnout vývody, prasknout membrána a podobně - jevy to vesměs zajímavé, pohříchu však nežádoucí.

Hraniční velikosti výchylek jsou dány konstrukcí magnetického obvodu a délkou kmitací cívky a pokud je výrobce uvádí, není radno je překračovat. Velikost maximální lineární výchylky se dá přibližně odvodit z konstrukčních údajů reproduktoru - její mezivrcholová hodnota je totiž dána jako rozdíl délky kmitací cívky (voice coil length) a délky vzduchové mezery (airgap length).

U velmi kvalitních basových reproduktorů může být patnáct i více milimetrů. Pro názornější informaci uvedeme dva příklady basových reproduktorů s parametry vztahujícími se k výkonu. Jedná se o reproduktory SEAS, patřící do „lepší hifi“ kategorie. V posledních dvou kolonkách jsou uvedeny maximální dosažitelné akustické výkony omezené lineární výchylkou a jim odpovídající teoretické elektrické příkony pro udanou citlivost. Skutečné elektrické příkony by v důsledku kmitočtové závislosti citlivosti byly větší, o tom však později.

Příště: impedance, indukance, rezonance.

(Pokračování příště)

Tab. 1. Parametry basových reproduktorů

Typ	Průměr koše	Plocha membrány	Jmen. příkon krátkod./trvalý	Lin. výchylka (mezivrcholová)	Citlivost	Maximální akustický výkon/Elektrický příkon 50 Hz	Maximální akustický výkon/Elektrický příkon 100 Hz
P17REX	17 cm	130 cm <sup>2</sup>	250/80 W	6 mm	89 dB	4,1 mW/790 mW	65,3 mW/12,6 W
CA25RE4	25 cm	350 cm <sup>2</sup>	300/80 W	8 mm	89 dB	61,3 mW/6,3 W	980 mW/186 W

# Stavíme reproduktorové soustavy (III)

RNDr. Bohumil Sýkora

Zatím jsme se zaměřili hlavně na záležitosti okolo výkonu, a to jak po stránce elektrické (zde se jedná spíše o příkon), tak po stránce akustické (akustický výkon a některá jeho omezení). Dalším základním parametrem reproduktorové soustavy, který s výkonem úzce souvisí, je impedance. Ono se vlastně tak docela o parametr nejedná. Pro reproduktorové soustavy se uvádí tzv. nominální neboli jmenovitá impedance. Udává se v ohmech jako jistý číselný údaj - nejčastěji 4, 6 nebo 8  $\Omega$  - a reproduktorovou soustavu ani tak nepopisuje jako spíše zařazuje do kategorie „beden čtyř nebo jinoohmových“.

Ve skutečnosti je však impedance reproduktorové soustavy fyzikální veličina, která se matematicky popisuje velmi komplikovaně a pouze díky některým zjednodušujícím trikům se přesný popis dá nahradit popisem s pomocí čehosi jako kmitočtové charakteristiky, přesněji řečeno závislosti komplexní impedance na kmitočtu. Výchozím pojmem je odpor, což je druhá nezákladnější elektrická veličina. Připomeňme si, že pro potřeby definice fyzikálních jednotek je základní veličinou proud. Odpor je to, v čem se při průtoku proudu elektrické energie přeměňuje v jinou formu energie (zpravidla teplo). Jeden ohm je definován jako odpor, ve kterém se při průtoku proudu jeden ampér za jednu sekundu přemění v teplo energie jednoho joulu (neboli přeměňuje se výkon jeden watt).

Napětí se pak následně odvozuje s pomocí proudu a odporu - jeden volt je napětí, které vznikne při průtoku proudu jeden ampér odporem jeden ohm. A předchozí úvahy předpokládají, že velikost napětí je v každém okamžiku jednoznačně určena velikostí proudu, což je vyjádřeno Ohmovým zákonem ve známém tvaru  $U = I \cdot R$  ( $U$  je napětí,  $I$  proud a  $R$  odpor).

Jak je všeobecně známo, skutečný svět se podle zjednodušených teorií nechová, což v případě reproduktorových soustav a Ohmova zákona platí velmi důkladně. Zde totiž naprosto nefunguje

zjednodušení na jednoznačný vztah mezi okamžitou hodnotou napětí a okamžitou hodnotou proudu. Vztah mezi časovým průběhem napětí a časovým průběhem proudu je nutné zkoumat globálně (omlouvám se za tuto poněkud ošoupanou floskuli).

Pokud vyjádříme okamžité hodnoty proudu a napětí pro danou reproduktorovou soustavu (nebo jiný elektrický spotřebič) a daný budicí signál (proud spotřebičem tekoucí) jako jisté funkce času, pak mezi těmito **funkcemi** již jednoznačný matematický vztah existuje. Ten však není možné popsat jednoduchým vzorcem typu Ohmova zákona v základním tvaru, ale jedná se o rovnici s diferenciálními operátory na obou stranách. S použitím výše citovaných matematických triků lze tuto rovnici převést na rovnici algebraickou, ve které se však objevují komplexní (případně imaginární) čísla. Symbolicky je pak možné i nadále používat tvar zápisu obvyklý u Ohmova zákona, namísto odporu  $R$  se však objevuje impedance  $Z$ , která již není jednoduchou konstantou, nýbrž komplexním algebraickým výrazem (tzv. lomená racionální funkce s komplexním argumentem). Rovněž  $U$  a  $I$  je nutné chápat pouze symbolicky, spíše jako připomínku toho, že původně šlo o napětí a proud. Situace se poněkud zjednoduší, pokud se nezajímáme o obecné časové průběhy, nýbrž jen o průběhy harmonické (sinusové, kosinové nebo něco mezi).

**Potom forma Ohmova zákona platí v tom smyslu, že za  $U$  a  $I$  dosazujeme efektivní hodnoty příslušného napětí a proudu. Ve vyjádření impedance se objevuje algebraická funkce kmitočtu s komplexními koeficienty a do formy Ohmova zákona za odpor dosazujeme absolutní hodnotu této funkce pro daný kmitočet.**

Dá se tedy napsat:

$$U_{ef} = I_{ef} \cdot |Z|,$$

přičemž obecné vyjádření impedance  $Z$  jako funkce kmitočtu má tvar

$$Z = Z_0 \cdot (a_0 + a_1 jf + a_2 f^2 + a_3 jf^3 + \dots) / (b_0 + b_1 jf + b_2 f^2 + b_3 jf^3 + \dots).$$

$Z_0$  je konstanta, která zodpovídá za to, aby celý výraz pro impedanci měl

rozměr odporu. Koeficienty  $a_i$  a  $b_j$  jsou pak bezrozměrná reálná čísla, jejich konkrétní hodnoty vyplývají z vlastností reproduktorové soustavy (spotřebiče),  $f$  je kmitočet a  $j$  je imaginární jednotka. Absolutní hodnota se odvodí pomocí pravidel pro počítání s komplexními čísly. Pokud si tato pravidla pamatujete, víte také, že kromě absolutní hodnoty je komplexní číslo popsáno tzv. argumentem, který má charakter úhlu. Důležité je, že **argument impedance určuje fázový posuv mezi proudem a napětím.**

Pokud se někomu tento výklad zdál příliš složitý, doporučuji mu zapamatovat si alespoň tyto základní skutečnosti:

1. Obecná impedance má rozměr odporu, není to však odpor.

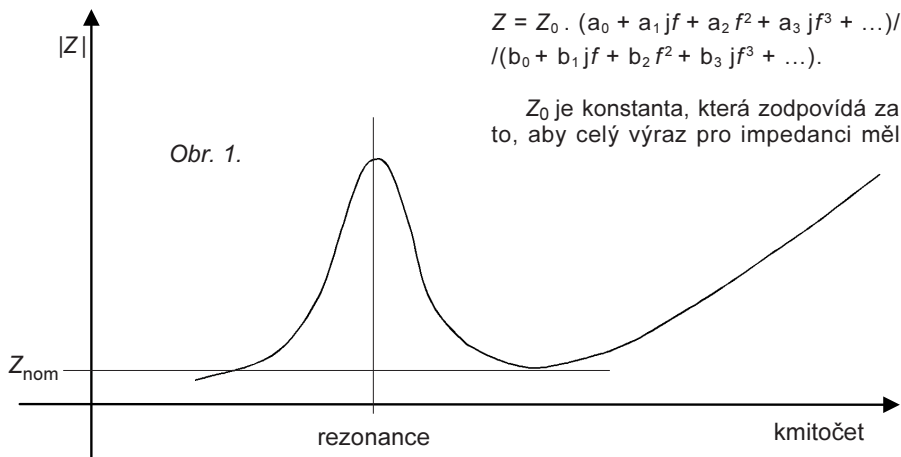
2. Ohmův zákon platí při obecné impedanci pro proud a napětí s harmonickým časovým průběhem o jistém kmitočtu v tom smyslu, že efektivní hodnota napětí je přímo úměrná efektivní hodnotě proudu, přičemž konstantou úměrnosti je absolutní hodnota komplexní impedance pro daný kmitočet.

V praxi se impedance reproduktorové soustavy udává nejčastěji křivkou závislosti absolutní hodnoty impedance na kmitočtu. Nejjednodušším případem je impedance jednoho dynamického reproduktoru v uzavřené nebo zcela otevřené (např. deskové) ozvučnici. Kmitočtová závislost její absolutní hodnoty má typický průběh s jedním maximem, jedním minimem a povolným nárůstem směrem k vyšším kmitočtům. Zjednodušeně je to naznačeno na obr. 1. Maximum odpovídá rezonančnímu kmitočtu reproduktoru, který zpravidla omezuje oblast použitelnosti reproduktoru zdola. Je určen mechanickými vlastnostmi reproduktoru a způsobem jeho montáže (druh a velikost ozvučnice). Minimální velikost impedance dosahovaná nad tímto kmitočtem by měla být udávána jako jmenovitá impedance reproduktoru ( $Z_{nom}$ ), zpravidla se však udává impedance poněkud větší.

Česká norma požaduje, aby absolutní hodnota impedance reproduktoru v pracovním pásmu neklesala pod 75 % jmenovité impedance (tento požadavek platí i pro reproduktorové soustavy, které ovšem zpravidla mají charakter průběhu podstatně složitější). Velikost impedance při rezonanci může být i více než o řád větší než jmenovitá impedance, např. reproduktor o jmenovité impedanci 8  $\Omega$  může mít při rezonanci impedanci větší než 100  $\Omega$  a přesto je vše v pořádku.

Pod rezonančním kmitočtem se impedance zmenšuje a přibližuje se stejnosměrnému odporu kmitací cívky reproduktoru. U vysokých kmitočtů se impedance zvětšuje vlivem indukčnosti kmitací cívky. Tento nárůst je ale zpravidla méně strmý, než by odpovídalo prosté indukčnosti, jejíž impedance (induktance) je kmitočtu přímo úměrná. To je způsobeno ztrátami v železe magnetického obvodu, který kmitací cívku obklopuje. Elektrické vlastnosti dynamického reproduktoru, pokud jde o impedanci, je možné vyjádřit náhradním schématem, kterému se podrobněji budeme věnovat příště.

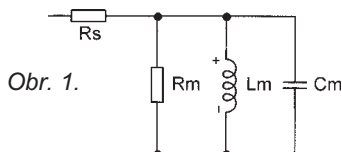
(Pokračování příště)



# Stavíme reproduktorové soustavy (IV)

RNDr. Bohumil Sýkora

V předchozí části jsme si alespoň rámcově objasnili praktický význam pojmu impedance. Snad by bylo vhodné ještě zdůraznit, že impedance v základním smyslu je vždy vztažena k dvojici svorek elektrického (případně, chcete-li, elektronického) objektu, neboli, jak moderní české pojmosloví nazývávi radí, k jedné bráně elektrického obvodu. V maximálním zjednodušení je impedance to, podle čeho můžeme usoudit, jak bude vypadat napětí na takové dvojici svorek (či bráně), pokud jimi bude protékat elektrický proud. Reprodukční jakožto elektrický předmět má zpravidla jednu dvojici svorek. Říkáme „zpravidla“ proto, že existují i reproduktory s větším počtem svorek, těmi se však budeme zabývat na jiném místě. Pokud nás zajímá chování reproduktoru z hlediska vztahu mezi napětím na těchto svorkách a proudem, který reproduktorem protéká, můžeme reproduktor popsat s použitím náhradního schématu jistého dvojpólu, případně jednobranu.



V nejjednodušší podobě je takové schéma na obr. 1. Toto schéma je odvozeno na základě tzv. elektroakustické analogie (viz příslušná literatura) a zahrnuje stejnosměrný odpor kmitací cívky  $R_S$ , ekvivalent mechanického tlumení kmitacího systému  $R_m$ , ekvivalent tuhosti závěsu membrány  $L_m$  a ekvivalent hmotnosti kmitacího systému  $C_m$ . Takový dvojpól se chová jako tlumený paralelní rezonanční obvod s přidavným sériovým odporem, takže pro nulový a nekonečný kmitočet (tj. prakticky pro stejnosměrný proud a kmitočty řádu stovek kilohertzů) je jeho impedance rovna odporu  $R_S$ . Paralelní rezonance se pak v akustickém pásmu projevuje zvětšením impedance k maximum, na kterém je impedance rovna součtu odporů  $R_S$  a  $R_m$ . Kmitočet  $f_r$ , pro který rezonance nastává, je určen veličinami  $L_m$  a  $C_m$  podle známého vzorce:

$$f_r = 1/(2\pi\sqrt{L_m \cdot C_m}).$$

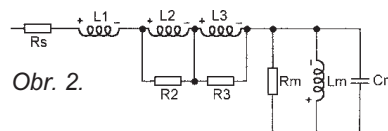
Hodnoty  $L_m$  a  $C_m$  závisí na mechanické konstrukci reproduktoru. Pro basové reproduktory se u rezonančního kmitočtu jedná zpravidla o desítky Hz, u středotónových reproduktorů bývá  $f_r$  řádu desítek až stovek hertzů a u vysokotónových reproduktorů mají rezonanci na stovkách až tisících Hz - hovoříme stále o dynamických reproduktorech!

Ve skutečnosti je impedance ovlivněna ještě tím, že kmitací cívka vyka-

zuje jistou indukčnost (jak to ostatně u cívek bývá zvykem). Vzhledem k tomu, že kmitací cívku přinejmenším zčásti obklopují pólové nástavce, které jsou ze speciální velice měkké oceli, je indukčnost kmitací cívky silně ztrátová. Pokud bychom měřili tuto indukčnost pro různé kmitočty, zjistili bychom, že s rostoucím kmitočtem se indukčnost zvolna zmenšuje a jako další sériový člen se objevuje ztrátový odpor, který se naopak s kmitočtem zvolna zvětšuje. Přibližně se to dá vyjádřit náhradním schématem na obr. 2. Indukčnost kmitací cívky a její ztráty reprezentují  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $R_2$  a  $R_3$ . Odpor  $R_1$  v souladu s běžnými zvyklostmi není ve schématu uveden; jeho zavedení by bylo potřebné pouze pro zpřesnění popisu impedance v ultrazvukové oblasti. U vysokotónových reproduktorů obvykle bývá možné vypustit i  $L_3$  a  $R_3$ .

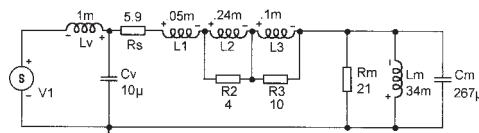
Zpřesněné náhradní schéma reproduktoru je potřebné zejména tehdy, chceme-li zjistit chování pasivní výhybky zatížené skutečným reproduktorem. Běžně publikované vzorce pro návrh výhybek jsou totiž odvozeny při předpokladu, že výhybka bude zatížena odporem (tj. „čistě reálnou“ impedancí). Rezonanční chování reproduktoru a zvětšení jeho impedance k vyšším kmitočtům však může chování výhybky velmi podstatně ovlivnit. Na obr. 3 je jedno konkrétní náhradní schéma reproduktoru s výhybkou typu „basová propust“, na obr. 4 pak porovnání amplitudových charakteristik přenosu výhybky do odporové zátěže a do zátěže reprezentované náhradním schématem reproduktoru.

Jak vidno, již chování reproduktoru jakožto kmitočtově závislé impedance není právě jednoduché. A to jsme vlastně ještě s výhybkami pořádně nezačali. Výpočet přenosu výhybky zatížené reálným reproduktorem - při-



Obr. 2.

čemž uvedená náhradní schémata jsou oproti skutečnosti stále ještě zjednodušená - se zcela vymyká možností „ručního“ výpočtu a předpokládá použití dosti náročné výpočetní techniky. Přitom napěťový přenos výhybky, tedy kmitočtová závislost napětí na svorkách reproduktoru buzeného přes výhybku zdrojem konstantního napětí, stále neříká příliš mnoho o tom, jak bude vypadat kmitočtová závislost akustického tlaku produkovaného reproduktorem.



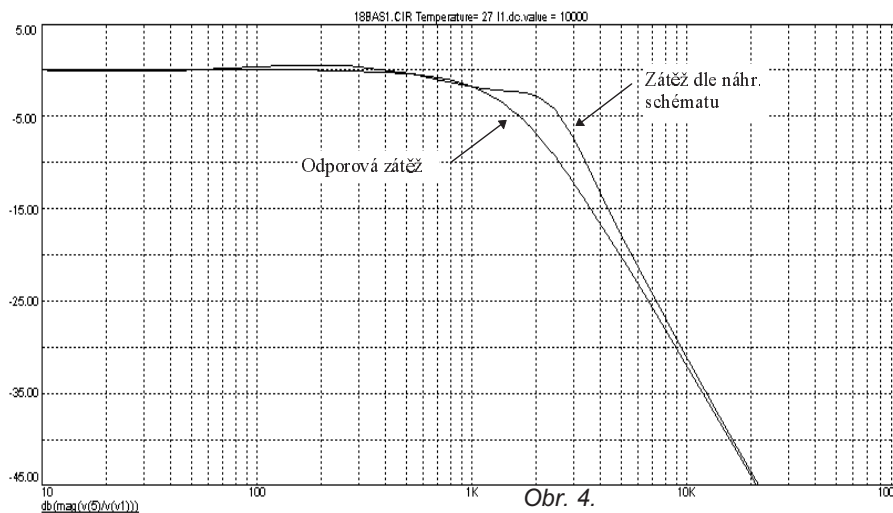
Obr. 3.

Zatím jsme jaksi mlčky předpokládali, že čtenářům je jasné, k čemu jsou nutné výhybky. Pro ty méně informované stručně opakujeme: výhybka slouží k tomu, aby do reproduktoru přicházela pouze ta část užitečného signálu, kterou je schopen optimálně zpracovat. Skutečně kvalitní reproduktory jsou optimalizovány vždy jen pro jistou část akustického pásma. V druhé části tohoto seriálu jsme se zmiňovali o tom, že basové reproduktory musí mít dostatečný průměr a maximální výchylku membrány; samozřejmě také přiměřenou zatížitelnost.

Od středotónových reproduktorů se požaduje maximální neutralita reprodukce, přičemž zatížitelnost také není zanedbatelná.

U vysokotónových reproduktorů je pak potřebný co nejmenší průměr a na výchylce příliš nezáleží. Dobré reproduktory jsou tedy vždy „specializované“ a pokud by do nich byl přiváděn kompletní signál, bylo by to přinejmenším mrhání výkonem a zbytečné (často dokonce osudné) přetěžování. Problémům kolem výhybek se samozřejmě v budoucnu budeme věnovat podrobněji.

(Příště: K čemu je a k čemu není ozvučnice.)



Obr. 4.

# Stavíme reproduktorové soustavy (V)

RNDr. Bohumil Sýkora

V prvním díle tohoto seriálu jsme se na chvíli zastavili u terminologické problematiky. Reproduktor, reproduktorová soustava, reprobedna, v cizích jazycích pak loudspeaker, loudspeaker driver, loudspeaker box, Lautsprecher, Lautsprecher-Chassis (mohli bychom dodat třeba ještě gromkogovoritel, visokogovoritel, le haut parleur a tak dále). Je v tom trochu zmatek, každý jazyk však po svém odlišuje reproduktor jakožto samostatný elektroakustický měnič od zařízení, které jako celek slouží k přeměně elektrického signálu na akustický signál, přičemž měnič (tedy reproduktor), či více měničů, obsahuje jako svoji podstatnou část.

To, v čem jsou měniče vestavěny, tedy ona vlastní (nejčastěji) bedna nebo skříňka, se správně odborně česky nazývá ozvučnice. Z hlediska hlavní funkce, tedy přeměny signálů, není její nejpodstatnější úlohou mechanické upevnění měničů. Ozvučnice má velice významný vliv na chování celé reproduktorové soustavy a pro některé signály je tento vliv dokonce rozhodující. Proč tomu tak je, pochopíme velmi snadno, když si představíme elektrodynamický reproduktor v nejběžnějším provedení. Membrána, která má většinou tvar přibližně komolého kužele (přesněji pláště komolého kužele), je pružně zavěšena v pevném koši. Na membráně je připevněna kmitací cívka, která má většinou „otevřený“, jsou v něm otvory, které spojují prostor mezi membránou a košem s okolím. Z hlediska polohy vůči koši můžeme říci, že membrána má přední a zadní stranu, případně plochu (zadní strana je ta, která je přivrácená ke koši a naopak).

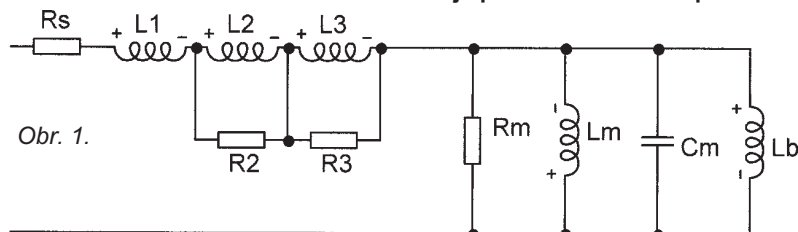
Jestliže se membrána pohybuje například „ven“, tedy tak, že se od koše vzdaluje, vzduch v blízkosti přední plochy se stlačuje a v blízkosti zadní plochy se zředuje. Toto stlačování a zředování je vlastní příčinou vzniku zvukové vlny. Obě strany membrány se přitom z tohoto hlediska chovají do značné míry nezávisle, takže přední strana membrány vlastně vyzářuje jednu zvukovou vlnu a zadní strana druhou. Podstatné je, že **tlakové změny v blízkosti přední a zadní strany membrány mají opačná znaménka (zředění je záporné, zhuštění naopak), v důsledku čehož oproti vlně vyzářované přední stranou membrány má vlna vyzářovaná zadní stranou membrány opačnou fázi.**

Dynamický reproduktor se tedy vlastně chová jako dvojice zářičů, které jsou od sebe jen nepatrně vzdáleny a pracují v protifázi.

Pokud by se vlny, vyzářené přední a zadní stranou membrány, nesetkávaly a obecně nijak neovlivňovaly, celkem nic zvláštního by se nedělo. Pokud se ovšem tyto vlny setkají, mají v důsledku opačné fáze tendenci navzájem se rušit. To nastává především u nízkých kmitočtů, kdy rozměry membrány jsou podstatně menší než vlnová délka vyzářených signálů. Jestliže se neučiní patřičná opatření, šíří se vlny vyzářené oběma stranami membrány jako kulové vlny v celém okolním prostoru a v celém tomto prostoru se vzájemně odcítají. Tento jev se někdy nazývá akustický zkrat. A oním patřičným opatřením, které akustický zkrat vyloučí, je použití ozvučnice.

Teoreticky nejjednodušší provedení ozvučnice je tzv. ozvučnice desková. Můžeme si ji představit jako nekonečně velkou pevnou (přesněji řečeno tuhou) desku s otvorem, v němž je vestavěn reproduktor. Deska rozdělí prostor na dva poloprostory, v každém z nichž se šíří jedna ze dvou vyzářených vln - přední a zadní - a deska brání jejich vzájemnému ovlivnění. Nekonečně velká deska je ovšem dost nepraktická, proto se obvykle používají desky konečných rozměrů. Konečnost rozměrů vede k tomu, že ozvučnice správně funguje teprve od jistého kmitočtu výše.

Toto provedení ozvučnice bývalo dříve dosti běžné u méně náročných aplikací, dnes se používá prakticky jen pro měřicí účely v podobě tzv. standardní ozvučnice. Daleko běžnější jsou ozvučnice v provedení skříňovém. V tomto případě se prostor příslušnou skříňí rozdělí na vnějšík skříňě a vnitřek skříňě. Reproduktor (nebo reproduktory) je vestavěn do stěny skříňě obvykle tak, že přední vlna se šíří do vnějšího prostoru a zadní vlna do vnitřku skříňě. Pokud je skříň dokonale uzavřená a její stěny jsou neprůzvučné, zůstane veškerá energie zadní vlny uvnitř, přemění se posléze v teplo a jako užitečný signál je bez ovlivnění zadní vlnou využita pouze vlna přední. Účelem takového tzv. uzavřené ozvučnice je tedy co nejdokonaleji zlikvidovat zadní vlnu. To je velmi zásadní rozdíl oproti např. ozvučným skříňím nebo deskám hudebních nástrojů, které se aktivně podílejí na tvorbě zvuku nástroje a jeho velmi podstatnou část samy vyzářují. **U reproduktorové soustavy s dokonalou uzavřenou ozvučnicí vyzářuje pouze membrána reproduktoru**



a všechny ostatní části soustavy jsou v naprostém klidu, jsou „mrtvé“.

Vlastně by se možná mělo mluvit spíše o „odzvučnici“, avšak zavedené názvosloví raději nebudeme měnit.

Uzavřená ozvučnice tedy dosti účinně a z konstrukčního hlediska i jednoduše potlačuje nepříznivý vliv vzájemného působení přední a zadní vlny na funkci reproduktoru. Nic však není zadarmo. V případě uzavřené ozvučnice platíme za jednoduchost a účinnost tím, že je dosti zásadně ovlivněno chování samotného reproduktoru. Jak jsme si řekli již dříve, z mechanického hlediska tvoří pohyblivý systém reproduktoru rezonanční obvod, jehož hlavními prvky jsou hmotnost membrány a k ní připojených částí, pružnost, případně poddajnost závěsu a mechanické ztráty v závěsu.

Na elektrické straně reproduktoru je to vyjádřeno náhradním schématem, uvedeným v předchozí části. Pokud reproduktor vestavíme do uzavřené ozvučnice, bude se při pohybu membrány dovnitř vzduch v ozvučnici stlačovat a při pohybu ven roztahovat. K tomu je zapotřebí přídavné síly, která se přičítá k síle potřebné pro pružnou deformaci závěsu membrány. Reproduktor se tedy bude chovat tak, jako by jeho závěs byl poněkud tužší. V náhradním schématu se to dá vyjádřit poměrně snadno pomocí přídavné indukčnosti  $L_b$ , připojené paralelně k indukčnosti  $L_m$ , reprezentující tuhost (poddajnost) závěsu (viz obr. 1). Prakticky se to projeví hlavně tím, že rezonanční frekvence soustavy reproduktor - ozvučnice bude vyšší než rezonanční frekvence reproduktoru samotného. Pokud je rezonanční frekvence reproduktoru  $f_r$ , pak výsledná rezonanční frekvence  $f_{rb}$  bude dána vzorcem

$$f_{rb} = f_r \cdot \sqrt{1 + L_m/L_b}$$

Toto vyjádření není příliš praktické, parametry reproduktoru se totiž zpravidla neudávají v podobě ekvivalentních elektrických veličin a ani výpočet ekvivalentní indukčnosti příslušné k ozvučnici není právě pohodlný. Proto bylo zavedeno používání tzv. ekvivalentního objemu reproduktoru. Tato veličina nahrazuje tuhost (poddajnost) závěsu reproduktoru, kterou popisuje tak, jako by veškerá tuhost kmitajícího systému reproduktoru byla tvořena tuhostí jakéhosi fiktivního vzduchového polštáře, uzavřeného v jistém objemu za reproduktorem. Tento ekvivalentní objem se zpravidla označuje jako  $V_{as}$  a jeho typická velikost se podle typu reproduktoru pohybuje od jednotek do stovek litrů. Změna rezonanční frekvence reproduktoru působením uzavřené ozvučnice o objemu  $V_b$  se pak dá popsat vzorcem

$$f_{rb} = f_r \cdot \sqrt{1 + V_{as}/V_b}$$

Pro názornost: máme-li reproduktor o ekvivalentním objemu 90 litrů a rezonanční frekvenci 30 Hz (může to být např. nějaký basový reproduktor o  $\varnothing$  21 cm) a tento reproduktor vestavíme do uzavřené ozvučnice o objemu 30 litrů, pak se jeho rezonanční frekvence zvýší na 60 Hz. To může vzbudit dojem, že takovýmto vestavěním se výrazně zhorší reprodukce basů, věc však není tak jednoduchá. Ve skutečnosti rezonanční frekvence reproduktoru není jediným parametrem ovlivňujícím reprodukci basů a za určitých okolností ani nemusí být parametrem nejdůležitějším. Ale o tom a dalších souvislostech si povíme příště.

(Pokračování příště)

# Stavíme reproduktorové soustavy (VI)

RNDr. Bohumil Sýkora

Minule byl vyrazen hlavní smysl používání ozvučnice a kdo dobře četl, pochopil, že tímto smyslem je totální likvidace zvuku vyzařovaného zadní stranou membrány reproduktoru. Nejde o likvidaci energie, ta se, jak známe, zničit nemůže, a tak v tomto případě přeměňujeme energii zvukovou v energii tepelnou. Ovšem není to vlastně škoda? Samozřejmě je a akustici si dost nalámali hlavu s tím, jak toto mrhání energií vyloučit nebo aspoň omezit, jinými slovy jak zvuk vyzářený zadní stranou membrány nějak užitečně využít.

Problém může na první pohled vypadat jednoduše - totiž spočívá vlastně jen v tom, že „zadní vlna“ má opačnou polaritu oproti vlně „přední“. Kdyby bylo možné nějak ji přepólovat, bylo by to v suchu. U elektrických obvodů je to celkem jednoduché, tam se prostě vezme transformátor jedna k jedné (případně jedna k minus jedné). Bohužel akustické systémy sice dokážeme popsat analogickým schématem složeným z prvků chovajících se jako elektrické součástky, můžeme dokonce vytvořit i akustický transformátor, z fyzikálních souvislostí však pro zapojení analogických prvků vyplývají jistá omezení a jedním z těchto omezení je nemožnost vytvoření transformátoru obracejícího polaritu.

Příroda našťástí byla k akustikům aspoň trochu milosrdná, takže ponechala jistou možnost pro otočení polaritu signálu bez transformátoru, a touto možností je fázový posuv. Než se však do tohoto tématu ponoříme hlouběji, ujasněme si trochu terminologii. Běžně se operuje s pojmy jako inverze polaritu, fázová inverze, otáčení fáze, otáčení polaritu nebo změna polaritu jako s pojmy víceméně ekvivalentními. To je ale hrubý omyl, pojem fáze znamená něco zcela jiného než pojem polaritu. Pojem fáze se původně zavádí pro periodické signály, v nejjednodušším případě pro signál sinusový. Tento signál se popisuje vzorcem:

$$A(t) = A_p \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

V tomto výrazu je signál popsán jako jistá veličina proměnná v čase. V okamžiku, kterému odpovídá časový údaj  $t$ , je velikost signálu (okamžitá velikost) rovna  $A(t)$ .  $A_p$  je špičková hodnota signá-

lu a  $f$  je jeho kmitočet. Výraz v závorce ( $2\pi \cdot f \cdot t + \varphi$ ) je **okamžitá fáze signálu** nebo, chápeme-li čas  $t$  jako obecnou nezávisle proměnnou, hovoříme o fázi signálu (okamžitá hodnota se cizojazyčně nazývá elongace). Veličina  $\varphi$  se pak označuje jako **fázový posuv** - opět ve zcela obecném smyslu.

Je jasné, že termín „fázová inverze“ nebo „otočení fáze“ nedává z hlediska právě uvedeného výkladu dost dobrý smysl. Fakticky by totiž znamenal něco jako „přepólování času“, tj. nahrazení signálu jiným signálem, u kterého by čas probíhal opačným směrem. V praxi se ovšem slovo fáze stalo součástí technické hantýrky, která si na matematickou přesnost nepotrpí, a v uvedeném souvislosti se užívá jako ekvivalent slova polarita (v tomto smyslu bylo použito i v předchozí části tohoto seriálu). Obrácení či inverze polaritu už smysl dává, je to prostě změna znaménka hodnoty signálu, kterou pro obecný časový průběh signálu vyjádříme vynásobením výrazu pro tuto hodnotu číslem  $-1$ . Mezi polaritou a fází však přece jen jistá - a ne právě nevýznamná - souvislost existuje. Vyplývá to z vlastností matematické funkce sinus, pro kterou platí:

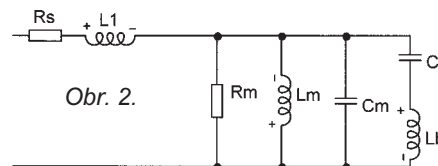
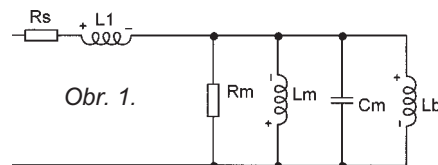
$$\sin(x) = -1 \cdot \sin(x + \pi)$$

S použitím vzorce vyjadřujícího časový průběh sinusového signálu to znamená, že můžeme psát:

$$-A(t) = A_p \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi + \pi)$$

U sinusového signálu tedy je **možné vhodným fázovým posuvem obrátit (invertovat) polaritu**.

V elektronice jsou samozřejmě známé obvody, u kterých vzniká změna fázového posuvu v závislosti na kmitočtu a je možné zkonstruovat i obvody, které pro jistý kmitočet (popř. kmitočty) obracejí polaritu tím, že zavádějí fázový posuv o velikosti  $\pi$  (ve stupních je to  $180^\circ$ ). Obdobně je tomu i v akustice - i zde lze zkonstruovat akustické obvody, které pro jistý kmitočet, díky svému fázovému posuvu, otáčejí polaritu. Slova „pro jistý kmitočet“ přitom neznamenají, že pro jiné kmitočty se neděje nic. I pro tyto kmitočty se jistý fázový posuv objevuje, liší se však od  $\pi$ , případně  $180^\circ$  tím více, čím více je kmitočet vzdálen od onoho optimálního.



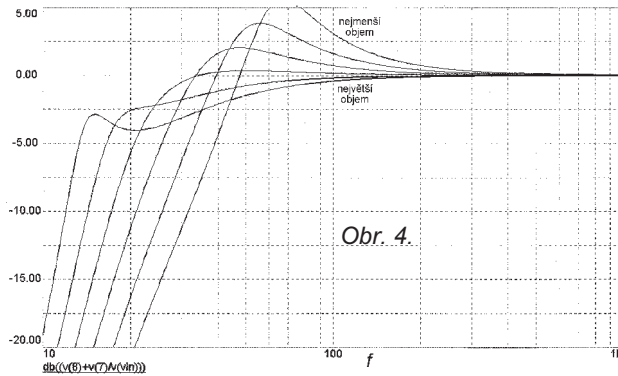
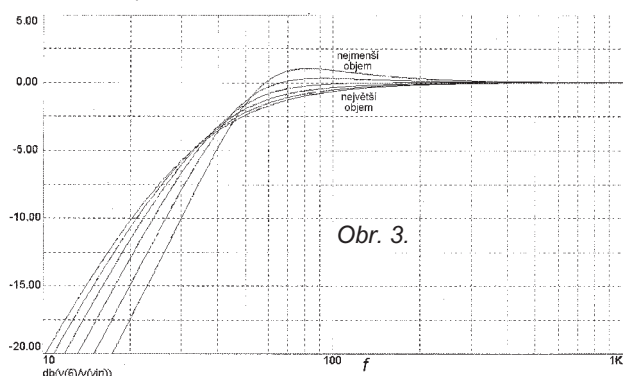
Pokud jde o konstrukci ozvučnice, můžeme takový akustický obvod použít tak, že signál vyzářený do vnitřního prostoru ozvučnice přes příslušný akustický obvod vyvedeme do vnějšího prostoru a tak alespoň do jisté míry, v jistém omezeném kmitočtovém pásmu zužitkujeme energii vyzářenou zadní částí membrány.

Nejnámější konstrukcí ozvučnice takto uspořádanou je **bassreflexová ozvučnice**. Akustický obvod tvoří otvor nebo trubice, spojující vnitřní objem skříně s vnějším, ve spolupůsobení s poddajností vzduchu uzavřeného ve skříně. Pro toto uspořádání je možné vytvořit analogické schéma, které si ukážeme. Nejprve se ale vrátíme k ozvučnici uzavřené. Její poněkud zjednodušené náhradní schéma je na obr. 1. Je možné ukázat, že akustický tlak, který reproduktor v této ozvučnici uzavřený vytváří v jisté vzdálenosti, je - opět zjednodušeně - přímo úměrný proudu tekoucímu kondenzátorem  $C_m$ .

Zjednodušené náhradní schéma ozvučnice typu bassreflex je na obr. 2. Zde přibyl kondenzátor  $C_b$ , který reprezentuje hmotnost vzduchu kmitajícího v otvoru nebo nátrubku. Mezi proudem, který jím protéká, a akustickým tlakem, za který je otvor (nátrubek) zodpovědný, platí opět přímá úměrnost, jen s jinou konstantou. To vše lze samozřejmě znázornit kmitočtovými charakteristikami. Typická ukázka amplitudové charakteristiky reproduktoru v uzavřené ozvučnici pro několik různých objemů je na obr. 3. Obdobné charakteristiky pro ozvučnici typu bassreflex jsou na obr. 4.

Z obou soustav charakteristik je patrné, že v pracovním pásmu reproduktoru je vždy jistá oblast (jakési střední basy), ve které se citlivost reproduktoru při zmenšujícím se objemu ozvučnice zvětšuje, i když obecně u nejnižších kmitočtů je při větším objemu citlivost vyšší. A optimalizační strategie v oblasti basů bude tématem příští části.

(Pokračování příště)



# Stavíme reproduktorové soustavy (VII)

RNDr. Bohumil Sýkora

Hlavním zdrojem nedorozumění jsou slova. To platí v každodenním životě a platí to i v elektroakustice, poťazmo „hifistice“, což se týká zejména různých subjektivních testů, popřípadě úvah pohybujících se někde na rozhraní techniky a estetiky či psychologie. Neschopnost nebo nemožnost vyjádřit jasnými slovy myšlenku, představy nebo pocity se zde často vysvětluje a obhajuje údajnou nemožností popsat některé sluchem vnímané vlastnosti zvuku pomocí měřitelných veličin.

Texty tohoto druhu obvykle hýjí přívlastky, u kterých je bez osobní konzultace s autorem vyloučené pochopit, co jimi bylo myšleno. Vzhledem k tomu, že se momentálně pohybujeme v oblasti konstrukce basových ozvučnic, mám na mysli především vyjádření typu basy „gumové“ či „kulové“, „rychlé“ a „pomalé“, „tvrdé“ versus „měkké“ a podobně. Bohužel ani po technické stránce není v terminologii tak docela jasno. Základní nedorozumění vzniká tím, že se zaměňují pojmy **nízký kmitočet**, **hluboký tón** a **bas ve smyslu basový nástroj nebo hlas**.

V akustice je pásmo nízkých kmitočtů (tedy nízkých zvukových kmitočtů) zdola ohraničeno mezí slyšitelnosti (asi 20 Hz). Určení horní hranice je věcí dohody a pro naše potřeby ji můžeme stanovit na 320 Hz, takže se bude jednat přibližně o čtyři nejnižší oktávy akustického pásma (pozor, nejde o oktávová pásma ve smyslu příslušných norem). V této oblasti leží základní kmitočty tónů, vydávaných basovými nástroji, jakými jsou třeba kontrabas, basová kytara nebo tuba. Díky přítomnosti vyšších harmonických složek můžeme ovšem tyto nástroje slyšet a rozpoznat i v případech, kdy základní kmitočet ve zvukovém spektru chybí - například v důsledku omezení přenášeného pásma u dané reproduktorové soustavy. O tom, zdali komplexní zvukový signál má nebo nemá

basový charakter, se rozhoduje především v pásmu zhruba 60 až 100 Hz. Charakter basů samotných při reprodukci zvuku pak určuje vyvážení reprodukce tohoto pásma oproti přilehlým nižším a vyšším pásmům. Poměrné zdůraznění signálů s kmitočty pod 60 Hz dává bas „měkký“, případně až „rozmazaný“, nadbytek složek v pásmu 60 až 100 Hz způsobuje náběh k dunivosti, těsně nad 100 Hz se může projevat „tvrdost“ a přebytek celého pásma vyšších basů (tj. 100 až 300 Hz) dává zvuku hučivý až „bučivý“ charakter. To vše je samozřejmě relativní, závislé na vkusu a složení originálního signálu a platné za předpokladu nezkrácené reprodukce; případné zkrácení situaci podstatně komplikuje.

Co z toho vyplývá pro konstrukci reproduktorových soustav, si můžeme objasnit na obr. 1., ve kterém jsou uvedeny vypočtené charakteristiky skutečného reproduktoru SEAS P17RCY, což je basový reproduktor o průměru koše 17 cm, s vlastním rezonančním kmitočtem 35 Hz (platí pro reproduktor bez ozvučnice, tj. „volně ve vzduchu“), a ekvivalentním objemem 41 litrů. Reproduktor má celkový činitel jakosti 0,23, což je veličina, ke které se ještě vrátíme. Křivka A udává charakteristiku reproduktoru v uzavřené ozvučnici o objemu 20 litrů. Z hlediska přenosu nejnižších kmitočtů je její průběh relativně nejpříznivější, citlivost však začíná výrazněji klesat již nad kmitočtem 100 Hz. Takto konstruovaná reproduktorová soustava by dávala reprodukci basů „měkkou“, ale mdlou a nevýraznou. Křivka B odpovídá basreflexové ozvučnici o stejném objemu, naladěné na 40 Hz. Průběh je sice u nejnižších kmitočtů horší, avšak v oblasti, která je pro sluch podstatná, tj. v pásmu od zhruba 30 Hz výše, bude reprodukce basů výrazně lepší, basy budou „konkrétnější“ a „pevnější“. Křivka C, která je vypočtena opět pro

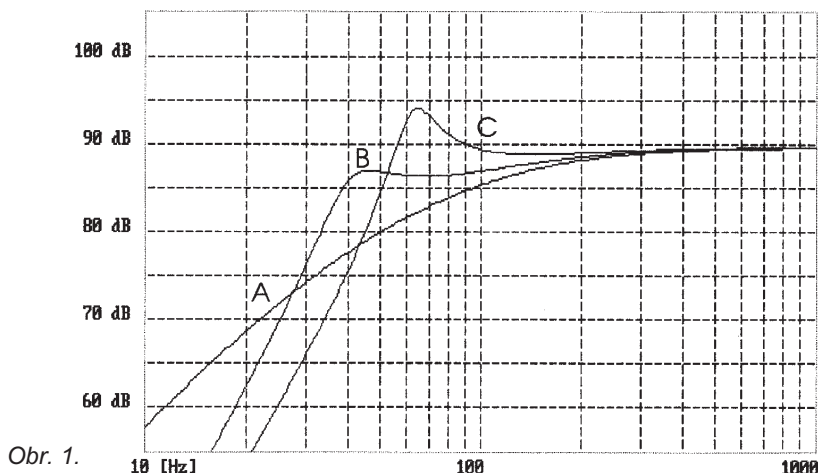
basreflex s objemem 20 litrů, avšak naladěný na 60 Hz, vykazuje výrazný zdvih v okolí 65 Hz. Výsledný zvuk by již měl dunivý charakter, u některých typů nahrávek a hudebních žánrů by to však mohlo být hodnoceno příznivě.

Vida, kolik je možností při témže reproduktoru v témže objemu. A co je z toho správné? Zhruba platí, že charakteristika by měla být pokud možno vyrovnaná. Pokud se podaří dosáhnout převýšení v oblasti pod 50 Hz, aniž by se přitom ošidily „vyšší“ basy, je výsledek obzvláště impozantní. Avšak pozor, takto konstruovaná reproduktorová soustava je velmi účinným zkoumadlem akustických vlastností poslechového prostoru. A pokud je tento prostor v oblasti nejnižších kmitočtů nedostatečně zatlumen (což je skoro pravidlem), nebývá celkový dojem právě nejlepší v důsledku dunění samotného prostoru.

Uvedené porovnání křivek dosti názorně ukazuje, jaké výhody přináší basreflex. Při správném použití může výrazně zlepšit reprodukci basů v oblasti, která je pro ucho z hlediska vnímání hudebního basu nejpodstatnější, i když reprodukce nejnižších kmitočtů se basreflexem obecně zhoršuje. Druhou výhodou je možnost významného zmenšení zkreslení basů přinejmenším v blízkosti kmitočtu, na který je basreflex naladěný. Nevýhodou basreflexu je pak to, že u nejnižších kmitočtů se reproduktor chová, jako by žádnou ozvučnici neměl. To (kromě již zmíněné ztráty citlivosti na těchto kmitočtech) způsobuje také zvětšení maximální výchylky membrány v této oblasti oproti ozvučnici uzavřené. Při náhodném výskytu stejnosměrných impulsů v budicím signálu (např. při zapnutí nebo vypnutí zesilovače) se pak může snadno poškodit reproduktor (tzv. „vystřelení“ kmitačky z magnetického obvodu apod.).

A ještě jak je to s tím činitelem jakosti. Jak jsme si ukázali v předchozích částech, chová se reproduktor z elektrického hlediska jako paralelní rezonanční obvod. Pokud je reproduktor připojen na výstup zesilovače s velmi malou výstupní impedancí, je vlastně jakoby zkratován a příslušný rezonanční obvod je tedy přemostěn stejnosměrným odporem kmitací cívky (plus její indukčnosti, ale ta se u nízkých kmitočtů neuplatní). Celkový činitel jakosti reproduktoru je pak definován jako činitel jakosti zatlumeného rezonančního obvodu, který je tvořen paralelní kombinací indukčnosti  $L_m$ , kapacity  $C_m$  a paralelně spojených odporů  $R_m$  a  $R_s$ . Pokud je činitel jakosti reproduktoru větší než 0,71 (druhá odmocnina z jedné poloviny), je na jeho charakteristice převýšení i bez basreflexu, dokonce i v nekonečné ozvučnici. Takový reproduktor se pro použití v basreflexu příliš nehodí. Pokud je činitel jakosti menší než 0,2, je charakteristika s basreflexem značně zvlněná. Nejvhodnější z hlediska použití v basreflexu jsou reproduktory s činitelem jakosti v rozmezí 0,25 až 0,5.

(Příště: Začínáme s výhybkami.)



Obr. 1.

# Stavíme reproduktorové soustavy (VIII)

RNDr. Bohumil Sýkora

Jásejte, přátelé bastlíři, konečně se dostáváme k něčemu konkrétnějšímu. Pouštíme se totiž do problematiky výhybek. Pokud máte dojem, že před tím bylo mnoho teorie, je to jen proto, že nevíte, jak opravdová teorie vypadá. Ale stejně, muselo to být. Ono je vždycky užitečné ujasnit si, jakou řečí budeme hovořit a co její jednotlivá slova znamenají. Nejinak je tomu samozřejmě u výhybek, a tak se i u nich trochu podíváme na terminologii.

Výhybka pro reproduktorovou soustavu je v rámci všeobecné elektroniky speciálním případem dělicího filtru. Dělicí filtry se hojně vyskytují ve sdělovací technice a i když s nástupem digitální elektroniky jejich hvězda trochu pohasla, stále ještě se s nimi můžeme setkat např. u systémů tzv. nosné telefonie, popř. telefonie s frekvenčním multiplexem. V této technice se více telefonních (tedy hovorových) signálů pošle po jednom vedení tak, že se proti sobě patřičným směřováním kmitočtově posunou a poskládají v kmitočtové doméně jeden vedle druhého, a rozdělí se tak, že se použité kmitočtové pásmo sadou **dělicích filtrů** „rozkrájí“ na dílčí pásma a ta se zase směřováním vrátí na původní místo. Pokud se to nepovede přesně, pak hlásky v telefonu nabývají poněkud kvákového charakteru, avšak na srozumitelnost to nemusí mít katastrofální vliv. Dělicí filtry pro telefonii jsou vlastně pásmové propusti, od kterých se požaduje, aby v přenosovém (propustném) pásmu byla jejich charakteristika víceméně plochá a mimo toto pásmo co nejrychleji padala k nule, popř. v decibelech k minus nekonečnu. Celkem se přitom netřeba zajímat o to, co by se stalo, kdyby se signály za výstupy filtrů zase sčítaly.

U reproduktorových výhybek tomu je jinak. Zde obvykle není třeba, aby přenos mimo propustné pásmo se nějak extrémně prudce zmenšoval, zato však hodně záleží na tom, co se stane, když po předchozím rozdělení dílčí signály zase dáme dohromady. To „dáme dohromady“ může znamenat prostý součet, ale taky nemusí. Ujasníme si to na nejjednodušším možném případě, na dvoupásmové výhybce. Ta má za úkol do basové větve poslat signály s kmitočty nižšími a do výškové větve signály s kmitočty vyššími, než je jistá frekvence, které je zvykem říkat dělicí frekvence. Když si vzpomeneme, že přenos harmonického signálu můžeme symbolicky popisovat funkcí kmitočtu vynásobeného imaginární jednotkou a ještě k tomu  $2\pi$ , pak chování nejjednoduššího možného filtru realizujícího dolnopropustnou větve výhybky můžeme popsat vzorcem:

$$T(\omega) = 1/(1 + j\omega/\omega_0).$$

Veličina  $\omega$ , zvaná též kruhová frekvence, není nic jiného než normální frekvence vynásobená  $2\pi$ , čili  $\omega = 2\pi f$ . No a  $\omega_0$  stejným způsobem odpovídá dělicí frekvenci  $f_0$ . Mnozí z vás jsou jistě obeznámeni se

symbolicko-komplexním popisem harmonických signálů a je jim jasné, oč jde. Tady se podrobnosti této metody zabývat nebudeme, to už by se začínalo příliš podobat skutečné teorii. Postačí nám vědět, že když harmonický signál o kruhovém kmitočtu  $\omega$  prochází filtrem s přenosovou charakteristikou popsanou funkcí  $T(\omega)$ , pak se jeho amplituda změní v poměru daném absolutní hodnotou funkce  $T$  pro dané  $\omega$ . Co je absolutní hodnota komplexního čísla, to by snad mělo být slovně čtenáři známo (nevím, v které třídě základní školy se to teď učí). Výraz pro přenos dolnopropustné větve převedený do jazyka absolutních hodnot nabude tvaru:

$$|T(\omega)| = 1/\sqrt{1 + \omega^2/\omega_0^2}.$$

Vím, že to začíná vypadat trochu děsivě, ale ve skutečnosti je to velice prosté. Předpokládejme, že momentálně zpracováváme signál, který má kmitočet rovný dvojnásobku dělicího kmitočtu. Podíl „omega lomeno omega nula“ bude mít hodnotu 2, jeho druhá mocnina bude čtyři, výraz v závorce se tedy bude rovnat pěti, jeho odmocnina bude přibližně 2,24 a převrácená hodnota přibližně 0,45. To znamená, že zpracováváný signál bude mít po průchodu filtrem amplitudu rovnou 0,45násobku výchozí hodnoty, ať tato hodnota bude jakákoli. Pokud bude kmitočet signálu podstatně větší než dělicí frekvence, bude amplitudový přenos filtru přibližně nepřímo úměrný frekvenci, takže při jejím zdvojnásobení se zmenší přenos na polovinu. Zdvojnásobení frekvence je vzrůst o jednu oktávu, pokles amplitudy na jednu polovinu je pokles o 6 dB - hle, získali jsme filtr se strmostí šest decibelů na oktávu.

Máme tedy (alespoň na papíře) propust pro nízké kmitočty. Nyní potřebujeme ještě propust pro výšky. Tu dostaneme velice snadno, když ve vzorci pro komplexní přenos nahradíme jedničku v čitateli výrazem  $j\omega/\omega_0$ . Kdo si dá práci a spočítá si příslušné absolutní hodnoty, zjistí, že pro signál o kmitočtu rovném **polovině** dělicího kmitočtu dostaneme u odvozené výškové propusti přenos přibližně 0,45, tedy totéž, co u basové propusti pro **dvojnásobek**.

A je tu ještě jedna důležitá věc. Když komplexní přenosy výškové a hlubkové propusti, odvozené podle předchozího postupu, spolu sečteme, dostaneme **jedničku**, a to nezávisle na kmitočtu (pozor, opakují, komplexní přenosy, nikoli absolutní hodnoty!). Což jinými slovy znamená,

že když signály na výstupech právě popsaných (tj. dolní a horní) propustí sečteme, dostaneme stejný signál, jako byl ten, který jsme do propustí přivedli. Takže dvojice těchto filtrů tvoří dělicí filtr vlastností sice nevalných, pokud jde o strmost poklesu mimo propustné pásmo (6 dB na oktávu není nic moc), ale zato vynikajících, pokud jde o možnost rekonstrukce signálu úpravou těmito filtry postiženého. Kdybychom měli k dispozici ideální vysokotónový reproduktor, ideální hlubkotónový reproduktor a dokázali je ideálně uspořádat v prostoru, pak bychom s použitím právě popsané výhybky dostali ideální dvoupásmovou reproduktorovou soustavu.

Zbývá ještě odpovědět na dvě otázky - co je to ideální reproduktor a jak se zatím pouze na papíře existující filtry promění ve skutečnost. Odpověď první: reproduktor ideální z hlediska konstrukce výhybky má citlivost a impedanci nezávislé na kmitočtu, přičemž ideální vysokotónový reproduktor tvoří s ideálním hlubkotónovým reproduktorem ideální dvojici, pokud ještě navíc mají citlivosti shodné. Napadá-li vás poťouchlá otázka, čím by se pak tedy vlastně lišil vysokotónový reproduktor od hlubkotónového, zde je odpověď - vysokotónový reproduktor musí mít membránu malých rozměrů, zatímco hlubkotónový musí mít membránu s velkým zdvihem - to jsme si však již říkali.

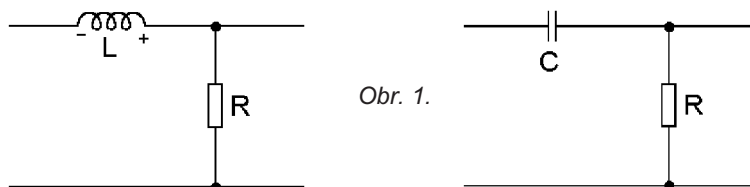
Pokud jde o realizaci příslušných filtrů, je to velmi prosté. Postačí dva jednoduché obvody - viz obr. 1.

Obvod s indukčností tvoří dolní propust s mezní frekvencí  $\omega = R/L$ , takže do příslušného vzorce bychom dosazovali  $f_0 = R/2\pi L$ .

Obvod s kapacitou tvoří horní propust, u které je mezní frekvence  $\omega = 1/RC$ , takže by platilo  $f_0 = 1/2\pi RC$ . Za  $R$  v obou případech dosazujeme impedanci příslušného reproduktoru (nemusí být nutně u obou stejné).

Naznačili jsme, že právě popsané obvody tvoří cosi jako ideální výhybku. To je nutně chápat tak, že s ideálními reproduktory, pokud by ovšem byly umístěny tak, aby jejich vzdálenost neměla na chování výsledné kombinace vliv (prakticky to znamená, že jejich vzdálenost musí být menší než čtvrtina vlnové délky pro  $f_0$ ), by se tato kombinace chovala jako jeden ideální reproduktor. Skutečnost je ovšem taková, že reproduktory mají k ideálnímu chování velmi daleko (o tom jsme se vlastně již zmiňovali - viz kmitočtová charakteristika reproduktoru v okolí rezonanční frekvence) a ideálně umístit se také zpravidla nedají. Na tyto okolnosti rádi zapomínají výrobci reproduktorových soustav, osazených právě těmito výhybkami, když zdůrazňují skvělé vlastnosti jednoduchých výhybek, aniž by vzali v úvahu, že výsledek má u důsledku neideálnosti reproduktorů do ideálu po čertech daleko. Ale tím a podobnými problémy se budeme zabývat příště.

(Pokračování příště)



Obr. 1.



# Stavíme reproduktorové soustavy (IX)

RNDr. Bohumil Sýkora

Minule jsme si přislíbili konkrétnější téma a pustili jsme se do výhybek. Nyní budeme pokračovat, a to jak po stránce lehce teoretické, tak již těžce praktické. Úplné schéma dvoucestné (dvoupásmové) výhybky je na obr. 1. Předpokládáme, že chceme postavit výhybku, která „chodí“ ideálně alespoň po elektrické stránce, což by nejspíše mělo znamenat, že amplituda součtu napětí na výstupu obou větví bude nezávislá na frekvenci. Musíme samozřejmě definovat dělicí frekvenci  $f_D$ , což je záležitost spadající spíše do oblastí akustiky a budeme se jí zabývat později; zatím se můžeme spokojit s praktickým poznatkem, že pro dvoupásmové reproduktorové soustavy leží optimální dělicí frekvence obvykle v rozmezí 2 až 5 kHz. Pokud by reproduktory měly reálné (tedy čistě odporové) impedance, pak by pro stanovení hodnot součástek stačil jednoduchý výpočet:

$$C_H = 1/2\pi f_D Z_H \quad L_B = Z_B/2\pi f_D$$

Z hlediska provozu zesilovače je účelné starat se také o vstupní impedanci výhybky. Při uvedených zjednodušeních a za předpokladu, že oba reproduktory by měly impedance (vlastně v tomto případě odpory) shodné a rovné  $Z$ , by její hodnota byla frekvenčně nezávislá a rovná taktéž  $Z$ .

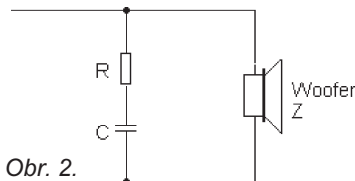
Pozornému čtenáři jistě neušlo, že jsme v právě uvedeném výkladu uvažovali jedinou dělicí frekvenci. Dvojici filtrů je samozřejmě možné navrhovat i tak, že každá větev má jinou mezní frekvenci a za určitých okolností to může být velmi výhodné. Čarování s dělicími a mezními frekvencemi totiž patří mezi mocné nástroje, jimiž lze na elektrické straně korigovat akustické nedostatky reproduktorů. Ke kvalifikovanému čarování tohoto druhu je samozřejmě nezbytně nutné měření, bez toho se však při seriózním vývoji reproduktorových soustav stejně neobejdeme. Je jen otázkou, co je pak vlastně dělicí frekvence výhybky. Ve skutečnosti je definována spíše akusticky, avšak pro zjednodušení za ni můžeme prohlásit geometrický průměr mezních frekvencí obou větví.

Podotkneme ještě, že i bez měření se dá předpokládat něco podstatného o souvislosti mezi vstupní impedancí výhybky (tj. impedancí soustavy) a eventuální neshodě mezních frekvencí dolnopropustné a hornopropustné větve. Pokud bude mezní frekvence dolnopropustné větve vyšší než

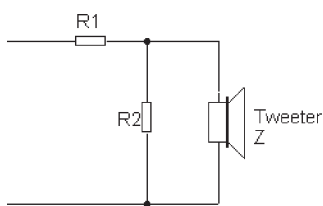
větve hornopropustné, na impedanční charakteristice se v okolí dělicí frekvence objeví pokles (propad, díra). V opačném případě tam bude nárůst (vrchol, hrb).

Reproduktory samozřejmě reálnou impedanci nemají, a tak se výsledné chování výhybky může dost podstatně lišit od teoretického předpokladu. Tím jsme se již dříve zabývali a nyní se podíváme, co se s tím dá dělat. První problém je indukčnost reproduktoru, která ve dvoupásmové soustavě hraje roli především u hlubokotónového reproduktoru. Prakticky způsobuje, že skutečná dělicí (mezní) frekvence je menší než vypočtená a pokles charakteristiky nad ní je méně strmý, než by měl být - může se kupříkladu stát, že namísto 6 dB na oktávu bude jen 4 dB na oktávu. Lékem je buďto úprava indukčnosti (nutno ověřit měřením - alespoň elektrickým), anebo tzv. kompenzace. Ta v nejjednodušším případě spočívá v připojení sériového členu  $RC$  paralelně k reproduktoru - viz obr. 2.

Konkrétní odpory a kapacity je možné stanovit výpočtem z náhradního schématu, přičemž následně se obvykle upřesňují experimentálně. Typické údaje pro basové reproduktory s impedancí 8  $\Omega$  leží v rozmezí 10 až 20  $\mu F$  a 8 až 12  $\Omega$ . Pro reproduktory 4  $\Omega$  je odpor poloviční a kapacita dvojnásobná. U vysokotónových reproduktorů se projevuje hlavně zvětšení impedance v okolí vlastní rezonance reproduktoru. V nejjednodušším případě to způsobuje snížení mezní frekvence příslušné větve výhybky. Efekt je tím menší, čím je rezonanční frekvence reproduktoru nižší oproti dělicí frekvenci výhybky a čím více je rezonance tlumena. Pro použití s jednoduchou výhybkou se vysokotónový reproduktor hodí pouze tehdy, je-li jeho rezonanční frekvence nejvýše třetinou dělicí frekvence, prakticky tedy nejvýše asi 1 kHz. Pro tento typ aplikace se vyrábějí speciálně konstruované vysokotónové reproduktory, jejichž společným rysem je aplikace magnetických kapalin (ferrofluidové systémy). Pozor však,

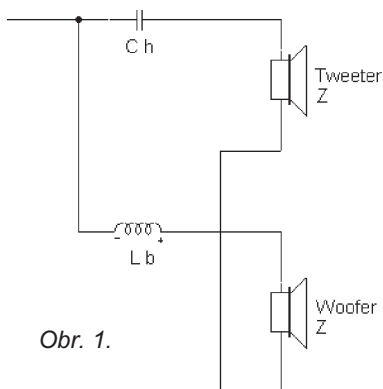


Obr. 2.

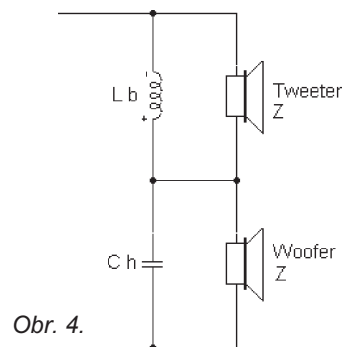


Redukce	R1/Z	R2/Z
1dB	0.11	8.20
2 dB	0.21	3.96
3 dB	0.29	2.42
4 dB	0.37	1.71
5 dB	0.42	1.36
6 dB	0.50	1.00

Obr. 3.



Obr. 1.



Obr. 4.

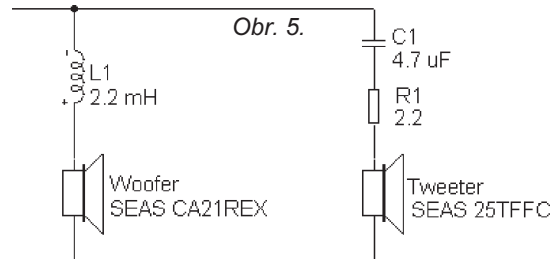
použití ferrofluidu ještě nemusí znamenat, že reproduktor se hodí pro použití s jednoduchou výhybkou, podmínka dostatečně nízké rezonanční frekvence je vždy prvořadá!

I u vysokotónového reproduktoru je možná elektrická kompenzace, příslušný obvod by však byl dosti složitý. Naštěstí ve většině případů platí, že citlivost vysokotónového měniče je zřetelně větší než měniče hlubokotónového a je nutné ji zmenšit. To se nejspíše uskuteční jednoduchým odporovým děličem (viz obr. 3), který pak současně omezí i vliv kmitočtové závislosti impedance reproduktoru na funkci výhybky. Vše je ovšem opět nutné kontrolovat měřením. Odpory rezistorů v děliči jsou dány v poměru k jmenovité impedanci reproduktoru a zatížitelnost použitých rezistorů by měla být alespoň 2, lépe však 5 W (drátové nebo metaloxidové provedení).

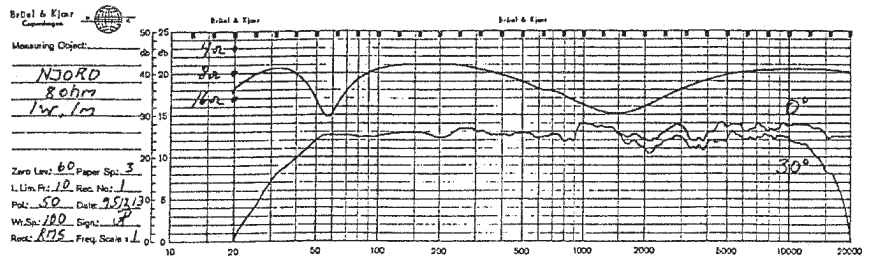
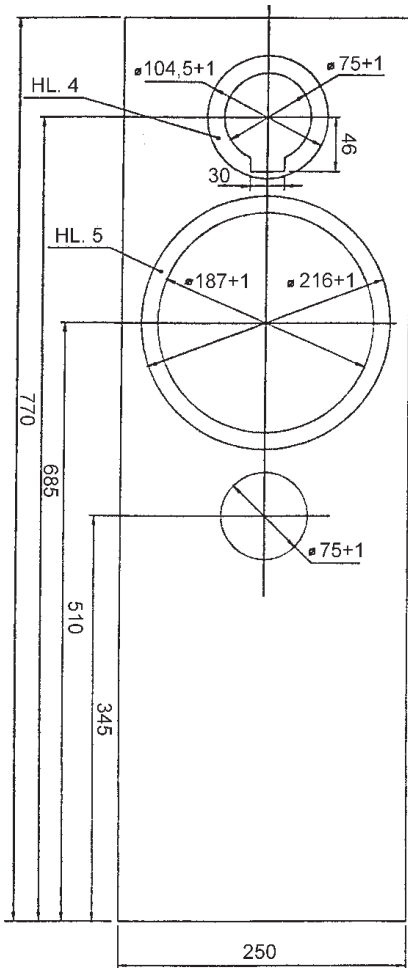
Pro vše, co jsme zatím popisovali, platí, že z hlediska elektrického vstupu jsou obě větve výhybky spojeny paralelně. Existuje však ještě jedno možné uspořádání výhybky, tzv. sériové. Je naznačeno na obr. 4. Toto provedení poněkud upadlo v zapomenutí, oproti paralelnímu však má jednu velmi zásadní přednost - součet napětí na výstupu obou větví (tedy svorkách reproduktorů) je vždy rovný vstupnímu napětí. Pro výpočet součástek a případné korekce platí totéž, co bylo řečeno o paralelním uspořádání. Případná chyba návrhu se projeví především na impedanční charakteristice, případná korekce vzájemným posuvem mezních frekvencí větví zde není možná. Nicméně, pokud bych měl navrhnout reproduktorovou soustavu s jednoduchou výhybkou a mohl bych použít velmi kvalitní měniče, u kterých by se nepředpokládala elektrická korekce, asi bych této variantě dal přednost.

Na začátku tohoto pokračování jsem slíbil něco těžké praktičnosti. Nuže, pro ty, kteří již hoří nedočkavostí, přinášíme první konkrétní ukázkou, která možno postavit kvalitní reproduktorovou soustavu.

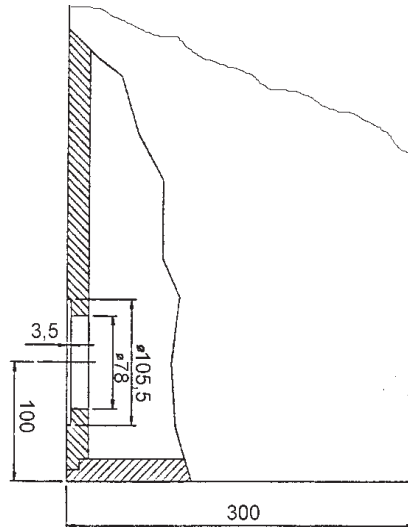
Jedním z výrobců reproduktorů, na které se dá spolehnout, je norská firma SEAS. A od ní pochází návod ke stavbě reproduktorové soustavy NJORD. Na obr. 5 je zapojení výhybky, na obr. 6. pak najdete informativní podklady pro stavbu skříně o objemu 40 litrů v provedení bassreflex tak, jak to doporučuje přímo firma SEAS.



Obr. 5.



Obr. 6. Mechanický výkres  
(tlumení - 50 mm minerální vaty  
nebo 75 mm syntetické vaty na všech  
stěnách kromě čelní stěny;  
bassreflex - průměr 70 mm, délka 140 mm)



Obr. 7. Impedanční charakteristika

Pro výrobu skříně se doporučuje materiál o tloušťce aspoň 18 mm (dřevotříška, MDF, tvrdá překližka) a rozhodně se nic nezkazí přidáním vyztužením hranolky 20 x 20 mm, kterými se propojí protilehlé svislé stěny alespoň na dvou místech. Účelné je zaoblení hran přední stěny, jiné detaily provedení již nejsou příliš kritické, stejně jako povrchová úprava - to je spíše věcí možností a vkusu stavitele. Výhybku je možné postavit metodou „nůty - dráty“, případně na univerzální desce s plošnými spoji; vzhledem k její jednoduchosti nemá velký význam navrhovat speciální desku. Hodnoty součástek postačí dodržet s pěti-procentní tolerancí, kondenzátory by měly být fóliové, tlumivky vzduchové.

Reproduktory, případně i součástky pro výhybku 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)