

Stavíme reproduktorové soustavy (XX)

RNDr. Bohumil Sýkora

Dejme tomu, že se nám podařilo nalézt basový, vysokotónový a případně také středotónový reproduktor, které splňují naše požadavky na kvalitu reprodukce. Známe jejich amplitudové charakteristiky, takže dokážeme (přinejmenším přibližně) stanovit dělicí frekvence. Strmosti výhybek jsou tak trochu otázka vkusu a „náboženského přesvědčení“, zhruba však platí, že u soustav pro domácí použití se uplatní strmost 6 nebo 12 dB na oktávu, zatímco u ozvučovacích soustav je běžné pracovat se strmostí 12 až 18 dB na oktávu (poslední případ hlavně u vysokotónových reproduktorů). Větší strmosti jsou spíše výjimečné a praktický význam mají hlavně u aktivních výhybek. Teď již vlastně zbývá jen vestavět to všechno do nějakého úhledného obalu (česky ozvučnice) a po nutném „doladění“ výhybky začít hrát. Jak však všeobecná zkušenost ukazuje, právě realizace onoho obalu je při stavbě reproduktorové soustavy tím největším problémem.

Především si dovoluji zopakovat jeden sice všeobecně známý, přesto však často opomíjený a někdy i záměrně zastíraný fakt. Úkolem ozvučnice reproduktorové soustavy je přesný opak toho, co je úkolem rezonanční skříňe hudebního nástroje. S výjimkou speciálních konstrukcí, jako je bas-reflex, pásmová propust apod., má ozvučnice reproduktorové soustavy pohltit, zlikvidovat a v teplo proměnit veškerý zvuk, který do ní reproduktory vyzáří. Jakékoli úvahy na téma vlivu použití ušlechtilých rezonančních dřev, speciálních houslařských laků atd. na zvuk soustavy jsou - jak si dovoluji citovat z jednoho staročeského textu - „humbug a podvod“. Použití těchto materiálů může mít rozhodující vliv na vzhled soustavy, vzhled soustavy může mít vliv na důvěru kupujícího ve výrobce, se zvukem to však nemá nic společného. Nejlepší materiál je ten, který je maximálně tuhý, maximálně „těžký“ a má maximální vnitřní tlumění. Z tohoto hlediska by například výborným materiálem bylo olovo plátované ocelí, jeho nevýhody však snad

není třeba uvádět. Z přírodních materiálů jsou dále vhodné některé kameny, např. břidlice nebo pískovec. Avšak tady již pozor, reproduktorové soustavy se z kamene skutečně občas vyrábějí, ušlechtilé druhy kamene vhodné pro tento typ zpracování však mají tendenci zvonit (žula, mramor). Vhodnější jsou materiály typu umělého kamene z přírodního kameniva pojeného umělou pryskyřicí, které mohou i velmi efektně vypadat. Dobré mechanické vlastnosti má také plastifikovaný litý beton.

V naprosté většině případů se ovšem ozvučnice vyrábějí z materiálů na bázi dřeva. Tam, kde záleží na mechanické odolnosti (u soustav určených pro častý transport), se používá překližka, pro náročné hifi aplikace je nejběžnějším materiálem dřevotřísková nebo dřevovláknitá deska MDF, a u nejlevnějších výrobků jsou běžné plasty. Což nelze generalizovat, poněvadž plastové součástky najdeme i na velmi luxusních soustavách a kompozitní materiály typu laminátů mohou mít z hlediska konstrukce ozvučnic vynikající vlastnosti (viz např. původní soustavy B & W Nautilus).

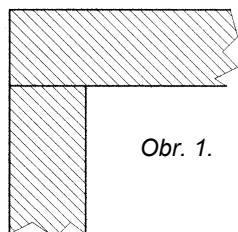
Při realistických předpokladech nicméně můžeme počítat s tím, že ozvučnice reproduktorové soustavy bude nejpravděpodobněji sestavena z materiálů deskového charakteru, nařezaných do polotovarů obdélníkového nebo obecně mnohoúhelníkového tvaru a pospojovaných truhlářskou technologií. Optimální tloušťka materiálu závisí na lineárních rozměrech ozvučnice a nepřímo tedy na jejím objemu. Pro objemy do 5 l stačí obvykle materiály do 12 mm tloušťky, pro objemy do 20 l je vhodnější použít tloušťku 15 až 18 mm. Pro větší objemy je tloušťka 18 mm minimem a konstrukce se obvykle ještě zpevňují vnitřním zebrovaním. Konstrukce totiž musí být „tuhá“ nejen pokud jde o samotný materiál, ale i o skříň jako celek. To má několik důvodů. Především, uvnitř ozvučnice vznikají nezanedbatelné změny tlaku,

kteří se uplatňují hlavně u nízkých frekvencí a rezonančních ozvučnic. Pokud není ozvučnice dostatečně tuhá, parazitně vyzařuje jako proměnlivý objem a tento efekt se ještě zvětšuje ohybovými rezonancemi stěn. A dále, závislost ohybových deformací stěn není lineárně závislá na vnitřním přetlaku či podtlaku, takže pulsací ozvučnice vlastně může vznikat nelineární zkreslení. Těmito nežádoucími efekty se ovlivňuje barva zvuku, a jak ukázala zkušenost autora, může být dokonce i ovlivněna lokalizace ve stereofonním obraze.

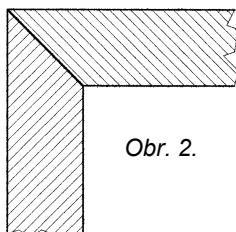
Na „tuhost“ skříňe má velký vliv, jakým způsobem jsou spojeny stěny. Klasické truhlářské techniky spojení „na ozub“ se dnes používají jen naprosto výjimečně. Nejjednodušší je pravouhlé spojení „na tupo“ s příznanou spárou nebo předýchováním (obr. 1). Tento způsob je výrobně nejjednodušší, avšak nejméně vzhledný a pro dostatečnou pevnost obvykle vyžaduje vyklížení hranolky. Poněkud lépe vypadá a hůře se vyrábí spojení na tupo na pokos (obr. 2). Z hlediska pevnosti je podstatně výhodnější spojení na pokos a zámek (obr. 3), které však vyžaduje značnou přesnost při výrobě. Určitým kompromisem je spojení na zámek (případně polodrážky) s následným zkosením a předýchováním (obr. 4).

Dostí tvrdým oříškem bývá optimální montáž reproduktorů. Jak jsme se zmiňovali již v minulé části, vysokotónový reproduktor by měl být zapuštěn do roviny s přední stěnou. To v podstatě platí i o středotónovém reproduktoru, u basového to již není tak kritické, pokud nejde o dvoupásmovou soustavu. Vliv na kvalitu soustavy má samozřejmě i umístění reproduktorů na přední stěně a jejich vzdálenosti. Obvyklé je umístění symetrické podle svislé osy, i když není akusticky nejvýhodnější. Optimum při mimoosovém umístění lze však nalézt pouze dalekosáhlým experimentováním.

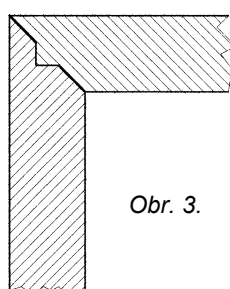
U třípásmové soustavy by měla být co nejménší vzdálenost mezi basovým a středotónovým reproduktorem. Pokud jde o vzdálenost mezi vysokotónovým reproduktorem a měničem vyzařujícím středy, rozhodující je rozteč os měničů. Z teorie vyplývá, že v optimálním případě by měla být rovna pěti čtvrtinám vlnové délky na dělicím kmitočtu. (Příště: Něco o měření)



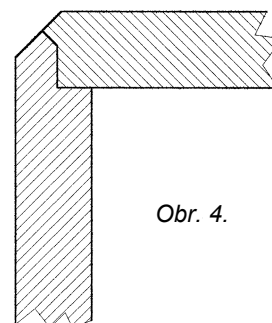
Obr. 1.



Obr. 2.



Obr. 3.



Obr. 4.

Stavíme reproduktorové soustavy (XXI)

RNDr. Bohumil Sýkora

Tak tedy, co se všechno dá na reproduktorových soustavách měřit (tentokrát to vezmeme trochu důkladněji a nezapomeňte, opakování je matkou moudrosti). Základní veličinou, která dává nejvíce informací o tom, co reproduktorová soustava dělá se vstupním signálem, je elektroakustický činitel přenosu. Může být definován různě, zpravidla se však mlčky předpokládá, že to je poměr mezi akustickým tlakem v jistém bodě prostoru k napětí na vstupu reproduktorové soustavy, které tento tlak vybudilo. Poloha tohoto bodu by v údajích o měření měla být vždy udána a mělo by být udáno také měřicí napětí. Činitel přenosu totiž na tomto napětí může být závislý.

Zpravidla se používá napětí, které by do odporu odpovídajícího jmenovité impedanci soustavy dodalo výkon 1 watt, což například znamená, že u soustavy o jmenovité impedanci 4 Ω by se použilo napětí 2 V. Pokud je současně vzdálenost měřicího bodu od soustavy 1 m, udává naměřený činitel přenosu charakteristickou citlivost soustavy. Dále se zpravidla předpokládá (a má to být udáno), že budícím napětím je harmonický signál, tj. „signál se sinusovým průběhem“. Lze měřit i s použitím jiných signálů, to je však nutné v údajích o měření uvést, protože výsledky mohou být na typu signálu závislé (o tom si něco řekneme později).

Vlastní činitel přenosu by měl být měřen v tzv. volném akustickém poli, ve kterém se zvuková vlna může šířit bez překážek do vzdálenosti rovné alespoň dvojnásobku vlnové délky. Prakticky by to znamenalo, že pro měření v celém akustickém pásmu, tj. od frekvence 20 Hz, bychom museli soustavu - a samozřejmě i měřicí mikrofon - umístit na stojan vysoký alespoň 34 m nebo ji zavěsit na jeřáb do této výšky, přičemž v okruhu 34 m by nesměly být žádné zvuk odrážející ani - pozor! - pohlcující předměty. To je samozřejmě dost těžko proveditelné, a proto se používají různé náhradní metody. Nejběžnější je měření v tzv. bezodrazové, případně bezodzukové („mrtvé“) komoře, totiž v prostoru, který má stěny obloženy materiálem dokonale nebo téměř dokonale pohlcujícím zvuk.

Nevýhodou této metody je „odsávací“ efekt, který zkresluje výsledky na nízkých kmitočtech. Pokud je totiž vlnová délka srovnatelná s rozměry měřicí komory, nešší se již zvuk volně a komora se začíná chovat jako silně tlumený vlnovod.

V důsledku toho přestává platit zákon nepřímé úměrnosti mezi velikostí akustického tlaku a vzdáleností, tlak klesá se vzdáleností strměji (pokles se blíží exponenciálnímu průběhu) a naměřený činitel přenosu je menší, než by odpovídalo skutečně volnému poli. Chyba takto vzniklá navíc závisí na vzdálenosti od soustavy. A na úplně nejnižších kmitočtech již zpravidla komora není zatlumená dokonale a navíc, pokud je dobře utěsněná, nefunguje jako volný prostor, nýbrž jako uzavřený objem, což vede k tomu, že naměřené výsledky jsou naopak větší než ve skutečně volném poli. Měření činitele přenosu v oblasti pod 100 Hz je tedy vždy poněkud problematické a je nutné používat různých korekčních „figlů“, aby se získaly alespoň trochu použitelné výsledky. Ty samozřejmě závisí na tom, jakých „figlů“ se použilo, a není proto nic divného na tom, že pro tutéž reproduktorovou soustavu můžeme nalézt v různých pramenech různé údaje, přičemž pro poslechové testy to platí v míře desateronásobně.

Avšak zpátky k měření. Už jsme narazili na kmitočtovou závislost a to, co nás obvykle nejvíce zajímá, je závislost činitele přenosu reproduktorové soustavy na kmitočtu budícího harmonického signálu. Tato závislost se zpravidla udává graficky v podobě křivky, znázorňující závislost absolutní hodnoty činitele přenosu na kmitočtu v logaritmickém měřítku. O absolutní hodnotě mluvíme proto, že činitel přenosu je veličina komplexní, má tedy také fázi a ta se někdy pro reproduktorové soustavy také udává, avšak neznám v akustice nic ošemetnějšího než měření fáze na reproduktorových soustavách, takže si dovolím tuto oblast přinejmenším prozatím vynechat. Pokud jde o amplitudu, citovaná křivka se správně nazývá amplitudová charakteristika, běžnější je však říkat kmitočtová charakteristika. „Měřit kmitočtovou charakteristiku“ tedy znamená

„snímat závislost amplitudy činitele přenosu na kmitočtu“ a případně tuto závislost znázornit graficky. Jakou metodou to lze provést, bude předmětem některého z příštích pokračování. Zatím se vraťme k základním pojmům.

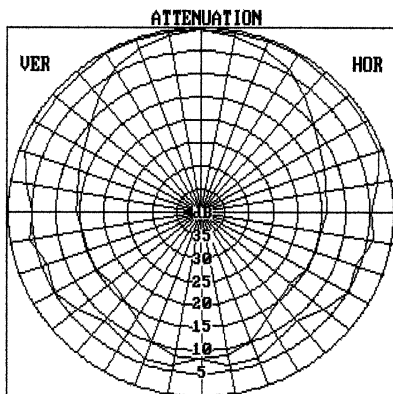
Základní amplitudová charakteristika se udává pro měřicí bod, který leží na referenční přímkce, což je zpravidla kolmice k čelní ploše reproduktorové soustavy, která prochází referenčním bodem na této ploše. Polohu tohoto bodu je nutné u výsledků měření udávat. U některých exkluzivních designů je však dost těžké rozhodnout, co je čelní plocha a k čemu má být co kolmé. Pak by samozřejmě výrobce měl udávat kompletní podmínky měření. Pokud tak nečiní, je zpravidla nejméně problematické považovat za referenční přímkku osu vysokotónového reproduktoru. Pokud jej soustava nemá, platí osa reproduktoru pro nejvyšší pásmo. Alternativou může být kolmice procházející bodem na půl cesty mezi vysokotónovým reproduktorem a reproduktorem pro nejbližší nižší pásmo, tedy basovým i dvoupásmové a středotónovým u třípásmové konstrukce.

Kromě základní (osové) amplitudové charakteristiky je vhodné zajímat se o to, jak soustava vyznačuje v jiných směrech. Obvykle se udávají charakteristiky pro měřicí body na přímkách, které leží ve vodorovné (horizontální) nebo svislé (vertikální) rovině a s referenční přímkou svírají jistý úhel (používají se zpravidla některé z hodnot 15, 30, 45 a 60 stupňů). Může se také udávat směrová charakteristika, což je vlastně grafické vyjádření závislosti amplitudy činitele přenosu na úhlu v některé z uvedených rovin pro jistý kmitočet. A existují i další způsoby, jak směrové vlastnosti soustav popisovat, to již však většinou bývá produkt snahy výrobce nějak ozvláštnit technické údaje a oslnit zákaznickou veřejnost něčím, čemu není příliš rozumět.

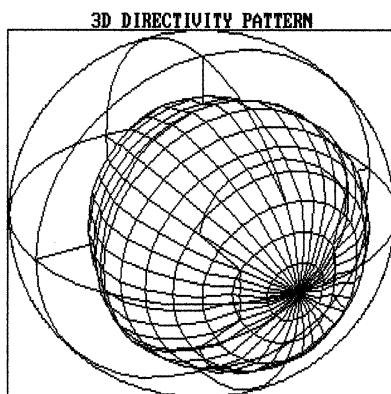
Určitou výjimku v tomto ohledu tvoří tzv. směrový balón, což je do roviny promítnuté trojrozměrné vyjádření závislosti činitele přenosu na úhlu v horizontální a vertikální rovině a dalších rovinách, které jsou vůči horizontální rovině více či méně šikmé. Hodnoty činitele přenosu pro body v obecných polohách, uspořádané do patřičných tabulek, jsou důležité pro tzv. akustické modelování.

Poloha měřicího bodu má, jak vidno, na výsledky měření velký vliv a je jasné, že každý výrobce se snaží najít takovou polohu pro měření, ve které by byly výsledky co nejlepší. Na poloze nezávislá je pouze výkonová charakteristika, tedy závislost vyzářeného výkonu na kmitočtu pro konstantní budící napětí. Tu je možné zjistit pomocí měření v tzv. dozvukové komoře, což je prostor s velmi velkou odrazivostí stěn a přesně určenými prostorově akustickými vlastnostmi. Jimi je definována souvislost mezi přivedeným akustickým výkonem a hustotou akustického výkonu, který v tomto prostoru vznikne, a na tomto základě je možné výkonovou charakteristiku zjišťovat. Metodika měření není nijak jednoduchá, proto nebudeme zabíhat do podrobností, porovnání výsledků měření různých soustav však dává, oproti měření činitele přenosu, spolehlivější obraz o tom co reproduktorové soustavy z hlediska kmitočtové závislosti vyzářování doopravdy dělají.

(Příště: Zkreslení, impedance...)



Obr. 1. Příklad směrových charakteristik (vnitřní je vertikální, vnější je horizontální)



Obr. 2. Příklad „směrového balónu“

Stavíme reproduktorové soustavy (XXII)

RNDr. Bohumil Sýkora

O impedanci reproduktorů (rozměrných dynamických), její kmitočtové závislosti a dalších vlastnostech jsme se zmiňovali již několikrát. Nyní se na tuto problematiku podíváme trochu zblízka. Omlouvám se, že se oproti slibu z minula zatím ještě nedostaneme ke zkrácení, avšak právě k tomuto tématu budeme potřebovat něco z toho, o čem bude tentokrát řeč.

Ze strany elektrické se reproduktor jeví jako dvojice svorek, tedy dvojpól nebo jednobran (pokud ovšem nejde o reproduktor s dvěma kmitačkami, ale to prozatím ponecháme stranou). Ze strany akustické se jeví jako membrána vyzařující zvuk, což lze do jisté míry chápat také jako dvojpól - uzemnění je okolní atmosféra s jistým rovnovážným barometrickým tlakem, živý pól pak je poslechový nebo měřicí bod, vykazující jistou okamžitou odchylku od rovnovážného tlaku, což je, jak známo, akustický tlak.

Reproduktor můžeme popisovat také z čistě mechanického hlediska. Uzemnění, případně zemní potenciál odpovídá poloze membrány v klidu, živým pólem je pohybující se membrána. Pohyb membrány můžeme nejnázorněji popsat závislostí její polohy na čase, v elektroakustice však může být výhodnější popis pomocí závislosti rychlosti na čase. Mechanické rychlosti odpovídá akusticky tzv. objemová rychlost, což je v podstatě objem vzduchu, který „proteče“, případně je přemístěn za jednotku času danou plochou, kterou je při studiu reproduktorů plocha membrány.

Reproduktor je mechanický systém, který se skládá z dílů majících vlastní hmotnost, vykazujících pružnost popsanou tuhostí nebo její převrácenou hodnotou - poddajností, a přeměňujících pohybovou energii na teplo, tedy tlumících. Jestliže pohyby v takovýchto soustavách mají harmonický charakter, tj. časový průběh jednotlivých veličin lze popsat funkcí sinus o jistém kmitočtu a fázovém po-

sunu, pak existuje dalekosáhlá analogie mezi chováním těchto soustav a chováním elektrických obvodů, složených z odporů, indukčností a kapacit. My se seznámíme jen s několika základními souvislostmi, zájemcům o podrobnější výklad doporučuji např. knihu prof. J. Merhauta - Teorie elektroakustických přístrojů.

Nejprve je nutné uvědomit si, co se čím a jak uvádí do pohybu. Na počátku je síla. Ta v dynamickém reproduktoru vzniká působením magnetického pole na proud, protékající drátem kmitací cívky, anebo, chcete-li, vzájemným působením víceméně konstantního magnetického pole buzeného magnetickým obvodem a magnetického pole buzeného proudem, který protéká kmitací cívkou. Pokud by magnetické pole bylo podél celé délky drátu konstantní a na drát kolmé, pak by velikost této síly byla dána součinem $I \cdot B \cdot l$, kde I je proud tekoucí drátem, B je velikost indukce magnetického pole a l je délka drátu. Žádný z uvedených předpokladů neplatí přesně, proto výrobci u reproduktorů udávají faktor $B \cdot l$, který je zjištěn zpětně na základě měření tak, aby platilo, že síla působící na kmitačku je úměrná součinu tohoto faktoru a protékajícího proudu (ve skutečnosti jde o integrál dosti složitě definované vektorové veličiny).

Síla působící na kmitačku ji uvádí do pohybu, přičemž v první řadě musí překonat setrvačnost celého kmitacího systému. To je fyzikálně vyjádřeno Newtonovým zákonem, který praví, že zrychlení je přímo úměrné síle a nepřímo úměrné hmotnosti. Pokud jde o harmonický pohyb, je dále maximální nebo efektivní hodnota rychlosti při daném zrychlení přímo úměrná maximální nebo efektivní hodnotě zrychlení a nepřímo úměrná frekvenci (obvykle se používá vyjádření s pomocí úhlové frekvence $\omega = 2\pi f$). Označíme-li maximální hodnotu rychlosti v a maximální hodnotu síly F , pak dostáváme vyjádření:

$$F = v \cdot m \cdot \omega.$$

V případě poddajnosti je síle úměrná výchylka, která je při dané rychlosti nepřímo úměrná kmitočtu a přímo úměrná poddajnosti. Označíme-li poddajnost c , pak platí:

$$F = v / (c \cdot \omega).$$

U tlumících prvků, které tlumí vlivem viskozity (nikoliv tedy např. mechanickým třením), je rychlost přímo úměrná síle a na kmitočtu nezávislá. Konstantu úměrnosti označíme r a dostaneme:

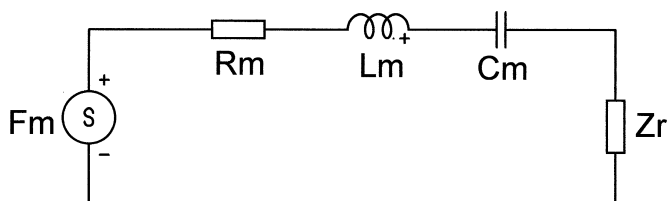
$$F = v \cdot r.$$

Pokud jste obeznámeni se základními elektronickými zákonitostmi, pak vám jistě neušlo, že tři uvedené vztahy jsou formálně velmi podobné Ohmovu zákonu v podobě, udávající vztahy mezi proudem a napětím u indukčností, kapacit a odporů. Jestliže totiž za sílu dosadíme napětí a za rychlost proud, pak hmotnosti odpovídá indukčnost, poddajnosti kapacita a tlumící konstantě odpor. Na tom je založena metodika tzv. elektromechanické analogie, která pracuje s pojmem mechanické impedance. Na jejím základě je možné studovat chování složitějších mechanických systémů tak, že systém složený z hmot, pružin a tlumičů popíšeme schématem složeným z ekvivalentních indukčností, poddajností a odporů.

Nejjednodušší varianta ekvivalentního mechanického schématu reproduktoru je na obr. 1, kde schematická značka indukčnosti zastupuje celkovou hmotnost kmitacího systému, kapacita udává celkovou poddajnost závěsu membrány a odpor odpovídá mechanickému tlumení, které je způsobené hlavně ztrátami v závěsu membrány a prouděním vzduchu kolem kmitačky. Napětí na obvodu odpovídá síle působící na kmitačku a proud tekoucí obvodem rychlosti pohybu kmitacího systému, avšak pozor, nejde o napětí nebo proud na svorkách reproduktoru, k těm se ještě dostaneme.

Ve schématu je uvedena také tzv. vyzařovací impedance membrány Z_r , která odpovídá reakci vzduchu na pohyb membrány. Její velikost je však ve srovnání s ostatními prvky celkem zanedbatelná, a pokud se zajímáme jen o impedanci, můžeme ji v prvním přiblížení vynechat (což si nemůžeme dovolit, zajímáme-li se o vyzařování reproduktoru, protože tam je vyzařovací impedance membrány jednou z nejdůležitějších veličin). A abychom si řekli alespoň něco o zkrácení v reproduktorech, jednou z příčin jeho vzniku je závislost mechanické impedance systému reproduktoru na okamžité výchylce, kterou způsobují především vlastnosti závěsu (mechanické omezení výchylky).

(Příště: elektrická impedance a (již doopravdy) zkrácení)



Obr. 1. Ekvivalentní mechanické schéma reproduktoru (veličiny s indexem m jsou ekvivalenty mechanických veličin, Z_r je ekvivalent vyzařovací impedance)

Stavíme reproduktorové soustavy (XXIII)

RNDr. Bohumil Sýkora

Zatím jsme odvodili analogické mechanické (mírně zjednodušené) schéma reproduktoru. Pokud se nyní chceme dozvědět něco o elektrické impedanci reproduktoru, musíme z mechanické strany na elektrickou převést chování mechanické části reproduktoru tak, abychom v konečném výsledku mohli posoudit podíl mechanických (případně akustických) prvků na impedanci (popř. vyzářeném akustickém výkonu). Spojení mezi mechanickou a elektrickou částí reproduktoru obstarává interakce mezi kmitačkou (případně proudem jí protékajícím) a polem magnetického obvodu. Pro sílu, která na kmitačku působí, platí již naznačený vztah

$$F = I \cdot Bl$$

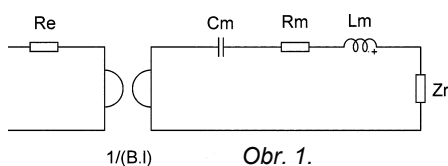
a dále je možné odvodit, že pro napětí na ní platí vzorec

$$U = Bl \cdot v, \text{ případně } v = U \cdot 1/(Bl),$$

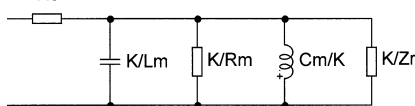
kde v je okamžitá rychlost kmitačky vůči magnetickému obvodu a U je okamžitá hodnota napětí indukovaná v kmitačce (správněji okamžitá elektromotorická síla).

A zde je kámen úrazu. Zatímco v elektromechanické analogii síle odpovídá napětí a proud rychlost, v prvním uvedeném převodním vztahu síle odpovídá proud a v druhém převodním vztahu rychlosti odpovídá napětí. Chceme-li získat elektrické schéma, popisující impedanci reproduktoru v souvislosti s mechanickými prvky, musíme proud zkonvertovat na rychlost a napětí na sílu. Zde si musíme pomoci speciálním prvkem, zvaným gyrátor. Ten se zavádí v teorii elektrických obvodů jako cosi, co převádí vstupní napětí na jemu přímo úměrný výstupní proud (nebo naopak), přičemž konstantou úměrnosti je tzv. gyráční konstanta, mající rozměr vodivosti, případně admittance. Gyrátor je tak jistým protějškem transformátoru, který převádí proud na proud nebo napětí na napětí, přičemž převodní konstanta je bezrozměrná. (V čistě mechanických obvodech se jako transformátor chová páka a v elektromechanické analogii najdeme transformátor např. u elektrostatických měničů).

Jestliže na výstupní svorky (bránu) gyrátoru připojíme jistou impedanci,



Obr. 1.



Obr. 2. $K = B^2 \cdot l^2$

pak na jeho vstupních svorkách se objeví převrácená hodnota této impedance, násobená druhou mocninou převrácené hodnoty gyráční konstanty.

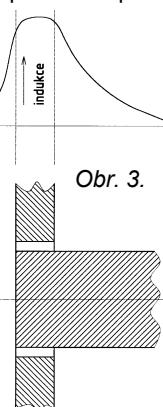
Indukčnosti jsou tak nahrazeny kapacitami a naopak a odpory vodivostmi a naopak. Struktura obvodu realizující danou impedanci se „z pohledu vstupních svorek“ jeví jako obvod duální, tj. takový, ve kterém jsou sériová spojení prvků nahrazena paralelními (a naopak).

V normální elektronice se s gyrátorem nesetkáme, poněvadž původně jde o prvek pouze hypotetický, s pomocí speciálních aktivních obvodů je však možné funkci gyrátoru realizovat, což se používá např. při konstrukci aktivních filtrů.

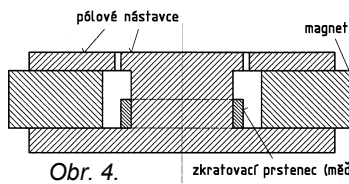
Doplníme-li v případě dynamického reproduktoru patřičný gyrátor (viz obr. 1), jehož gyráční konstanta je rovna $1/Bl$, dostaneme elektrické náhradní schéma reproduktoru ve známé podobě, jak je uvedeno na obr. 2. Ve schématech je doplněn ještě sériový odpor kmitačky R_e . Kromě toho je nutné respektovat vlastní indučnost kmitačky a ztráty vířivými proudy v materiálu magnetického obvodu, avšak o tom až později. Hodnoty prvků, které se do schématu dostaly z mechanické strany, jsou udány pomocí mechanických veličin z obr. 1 a gyráční konstanty.

A jak to všechno souvisí se zkreslením? V minulé části jsme se zmínili o tom, že jednou z příčin zkreslení je tzv. mechanické omezení výchylky. Jak vzniká, můžeme si snadno představit, uvážíme-li, jak je konstruován závěs kmitacího systému reproduktoru. Okraj je spojen s košem zvlněným mezikružím nebo gumovým „obloučkem“, středící membrána má rovněž vlnitý profil. Při malých výchylkách je síla potřebná k vychýlení úměrná výchylce, při větších výchylkách se však závěsové části začínají „natahovat“, takže síla potřebná k vychýlení se zvětšuje rychleji, až se při jisté výchylce dostane závěs do stavu, že kmitačku prostě dál nepustí, pokud se při extrémně velké síle mechanicky neporuší.

Obdobný efekt souvisí s rozložením magnetického pole. Při velkých výchylkách se kmitací cívkou dostává do míst, ve kterých je magnetické



Obr. 3.



Obr. 4.

pole slabší, protože většina indukčního toku je soustředěna v mezeře magnetického obvodu a její bezprostřední blízkosti (viz obr. 3) a profil jeho rozložení podél osy systému je navíc z konstrukčních důvodů nesouměrný. Tak vzniká závislost faktoru Bl na výchylce a tím i na rychlosti, takže vztahy popisující souvislost mezi proudem a výchylkou nebo rychlostí přestávají být lineární. Pro kmitočty pod rezonanční frekvencí má takto vzniklé zkreslení stejný charakter jako zkreslení vznikající mechanickým omezením, takže se zde velmi prudce zvětšuje s výchylkou.

Nad rezonanční frekvencí je situace podstatně odlišná. Vzhledem k tomu, že pohyb kmitačky je zde dán rovnováhou mezi silou působící na kmitačku (tzv. ponderomotorickou silou) a setrvačností kmitacího systému, otáčí se fáze pohybu kmitačky ve vztahu k budičímu proudu a ponderomotorická síla ve skutečnosti kmitačku z mezery magnetického systému nevypuzuje, avšak naopak ji tam vrací. Zkreslení vzniklé ztrátou magnetické interakce má pak „opačné znaménko“ oproti mechanickému zkreslení a do jisté míry je může kompenzovat. Obecně se jedná o zkreslení charakteru oboustranného omezení výchylky, které způsobuje vznik lichých harmonických složek (hlavně třetí), silně závisí na kmitočtu tak, že se zvětšuje s poklesem frekvence, a samozřejmě roste s rostoucí výchylkou. Největší vliv pak má pod rezonanční frekvencí reproduktoru, avšak tam již se obvykle reproduktor nevyužívá. Nesymetrie rozložení pole dále způsobuje vznik zkreslení sudými harmonickými, které se již závěsem nekompenzuje, je však možné potlačit je vhodnou konstrukcí magnetického obvodu (obr. 4).

Existují však i jiné mechanismy vzniku zkreslení, které rovněž souvisejí s tím, že činitel Bl není ve skutečnosti konstantní. K magnetické indukci v mezeře se totiž přičítá pole, vybuzevané v magneticky měkkém materiálu pólových nástavců proudem protékajícím kmitací cívkou (případně intenzitou pole tímto proudem vytvořenou). Kmitačka se tedy pohybuje v poli, daném součtem permanentního pole a proměnného pole, jehož časový průběh do značné míry „kopíruje“ průběh signálového proudu. Navíc velikost tohoto pole závisí na okamžité poloze kmitačky. Když si pak zkusíme vyjádřit časový průběh síly působící na kmitačku, dostaneme něco velmi ošklivě nelineárního a proto vznik významného zkreslení signalizujícího. Proměnné indukované pole je do jisté míry možné omezit umístěním tzv. zkratovacího prstence někde do magnetického obvodu (viz opět obr. 4). Jde o velmi masivní závit nakrátko, v němž se při změnách magnetického pole indukují proudy, které působí proti těmto změnám a tak omezují alespoň část zkreslení, především tu, která je dána druhou harmonickou.

(Příště: A to ještě není všechno...)

Stavíme reproduktorové soustavy (XXIV)

RNDr. Bohumil Sýkora

Minule jsme uvedli některé mechanismy, které vedou ke vzniku zkreslení při činnosti reproduktoru. Posledním z nich byla superpozice pole, vybuzeného signálovým proudem, na pole permanentního magnetu, vzniklá tak, že intenzita magnetického pole generovaná proudem indukuje v magneticky vodivém materiálu pólových nástavců přídatný indukční tok. Výsledný efekt je takový, že kmitací cívka je vtahována do mezery magnetického obvodu nezávisle na polaritě signálového proudu.

Materiál pólových nástavců je však vodivý také elektricky. V důsledku toho se v nich proměnným magnetickým polem indukují vířivé proudy, které vytvářejí vlastní magnetické pole, a to se opět superponuje na pole permanentního magnetu. Interakcí tohoto pole s polem kmitací cívky vzniká síla, která má snahu cívku z mezery magnetického pole vypuzovat. Jeho efekt je tedy v jistém smyslu opačný oproti předchozímu popsanému efektu a má tendenci jej částečně (někdy i zcela) kompenzovat.

Všechna uvedená rušivá pole jsou ovšem závislá na výchylce a také na kmitočtu, takže výsledné zkreslení je rovněž značně závislé na kmitočtu a obecně narůstá s výchylkou (i když v ojedinělých případech tak tomu nemusí pro jisté rozmezí výchylek být).

Jaký konkrétní charakter ta či ona složka zkreslení má, závisí na konstrukci magnetického obvodu - např. u složky způsobené vířivými proudy je rozhodující rozložení materiálu pólových nástavců podél osy systému a při dokonalé symetrii by tato složka obsahovala pouze liché harmonické. Malé zkreslení reproduktoru se tedy v praxi dosahuje hlavně tím, že různé složky nelinearity se do jisté míry (a v závislosti na kmitočtu) navzájem kompenzují, a jak dalece se to podaří, závisí na invenci a trpělivosti konstruktéra a výrobních možnostech.

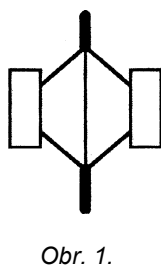
Existují různé triky, umožňující některou ze složek zkreslení potlačit. Jedním z nich je již uvedené použití zkratovacího prstence. Vířivé proudy lze omezit zvětšením elektrického odporu pólových nástavců, jak to dělá například firma ATM, která používá pólové nástavce ze spékaného práškového železa s malou elektrickou vodivostí. Problém je v tom, že odstraně-

ním jednoho rušivého efektu se může zmenšit vzájemně kompenzační účinek jednotlivých zdrojů nelinearity a výsledkem může být zhoršení vlastností reproduktoru, takže celé řešení se musí pojednat velmi komplexně.

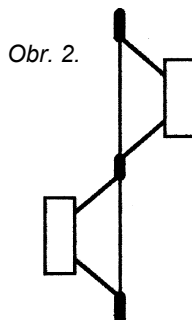
Sudé harmonické lze potlačit také dvojnásobným uspořádáním „pohonu membrány“ nebo membrán, a to buďto symetrickým řešením pohonného systému reproduktoru, které u svých špičkových modelů zavedla firma JBL, anebo lze při konstrukci reproduktorové soustavy použít dva reproduktorové měniče, obrácené proti sobě, což, pokud je mi známo, poprvé použila firma KEF. V tomto případě jsou možné dvě varianty, a to protisměrně sériově (protisměrně tandem - obr. 1) a protisměrně paralelně (obr. 2).

Avšak ještě není všemu trápení konec. Zdrojem zkreslení není jen nedokonalost magnetického obvodu a omezení výchylky membrány závěsem. Dostí významným zdrojem zkreslení může být také neregulérní chování té části závěsu membrány, která drží okraj membrány (okrajová vlnka), a také membrány samotné. Předpokládáme, že okrajová vlnka má průřez tvaru kruhového oblouku (přesněji vlastně části prstencového povrchu) a představme si, co se děje při vychýlení vlnky z rovnovážné polohy, jak je to naznačeno na obr. 3.

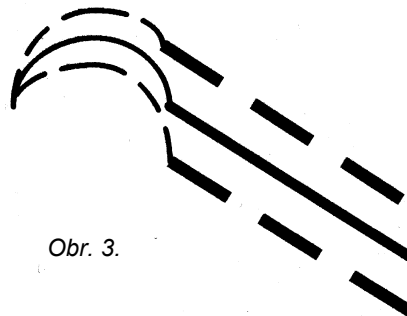
Z obrázku je (snad alespoň trochu) patrné, že při výchylce oběma směry je vlnka „natahována“ směrem ke středu, případně ose membrány. Je tedy vlastně v radiálním směru buzena silou, jež je vždy orientována k ose a její směr je tedy odvozen od „dvojnásobně usměrněné“ výchylky. Může se stát, že na některé frekvenci (popř. více frekvencích) pružnost vlnky spolu s její hmotností vede ke vzniku rezonance a v takovém případě se výrazně zvětší zkreslení sudými harmonickými



Obr. 1.



Obr. 2.



Obr. 3.

kými v blízkosti této frekvence (setkal jsem se s případem, kdy to bylo nejen slyšet, avšak radiální kmity vlnky byly dokonce i vidět).

Okrajová vlnka může být zdrojem také jiných typů zkreslení a není vyloučené, že tyto efekty v dřívější době způsobily nedůvěru ke „gumákům“, jak se obecně reproduktory s touto konstrukcí okrajového závěsu nazývaly. Rezonanční efekty je možné potlačit vhodnou volbou materiálu (např. pěnový polyetylen), všechny složky zkreslení vlnky se však odstranit nedají a trochu paradoxní je, že lépe se po této stránce chovají reproduktory starších konstrukcí s vícenásobnou vlnkou, popřípadě s takzvaným závěsem „B“, což jsou dvě menší vlnky vedle sebe.

Pokud jde o zkreslení samotné membrány, existují dva základní typy. Především je membrána namáhána na ohyb, ostatně ohybové kmity membrány neoddelitelně souvisejí s její funkcí, jak již bylo dříve uvedeno. Ohybové kmity mají nelineární charakter a, což je ještě horší, chybové složky vzniklé ohybovými kmity nemusí být v harmonickém vztahu k základnímu kmitočtu. A dále, v souvislosti s tuhostí okrajového závěsu a jeho setrvačností, spolu se setrvačností samotné membrány, je celá membrána namáhána na „vzpor“, což může vést ke vzniku takzvaného subharmonického zkreslení, tj. takového, u něž je kmitočet chybového signálu zlomkem (nejčastěji polovinou) budícího kmitočtu.

To by již byl trochu delší výklad, podotkneme jen, že problém subharmonického zkreslení se řeší použitím membrány nerovinného tvaru, tedy nikoli přesného kužele, nýbrž něčeho blízkého spíše rotačnímu hyperboloidu (tzv. NAWI - membrána). Nu, a když všechno shrneme, představíme si, že subharmonické mohou mít vlastní harmonické ... atd., tak zjistíme, že reproduktor je vlastně malý technický zázrak, jehož víceméně uspokojivá funkce je výsledkem urputného boje konstruktérů s přírodními zákony.

(Pokračování příště - „Pokračujeme směrem k bednám...“)

Stavíme reproduktorové soustavy (XXV)

RNDr. Bohumil Sýkora

V minulých dvou částech jsme věnovali hlavní pozornost různým druhům nedokonalosti reproduktorů. Nežli se začneme vážně zabývat konstrukcí reproduktorové soustavy, musíme se podívat ještě na jednu nedokonalost (či spíše skupinu nedokonalostí), a tou je nedokonalost vzduchu.

Souvisí to tak trochu s modelováním elektroakustických systémů. Zatím jsme se zabývali elektromechanickou analogií, u které se části mechanického systému nahrazují elektronickými prvky. V elektroakustice se však používá analogie elektroakustická, která má stejnou logiku jako analogie elektromechanická. Rozdíl je jen v tom, že sílu zastupuje akustický tlak a rychlost v běžném slova smyslu je nahrazena objemovou rychlostí. Zatímco v mechanické soustavě jsou její části spojeny ideálně tuhými a nehmotnými spojkami, v elektroakustické jsou jednotlivé díly spojeny přechodovými otvory, které mají určitou plochu.

Přechod z mechanické části na akustickou uskutečňuje ideální píst, který má plochu S . Síla působící na tuto plochu je dána součinem akustického tlaku a velikosti plochy, objemová rychlost pak je dána součinem plochy a rychlosti. Při přechodu z mechanické strany na akustickou tedy vlastně provádíme proudovou transformaci v poměru S .

Hovoříme pak samozřejmě o akustickém odporu, který souvisí s vlivem viskozity vzduchu při jeho průtoku potrubím nebo porézním materiálem, o akustické hmotnosti, která se přiřazuje hmotnosti jistého objemu vzduchu posouvaného opět čímsi jako potrubím, a konečně o akustické poddajnosti dané poddajností uzavřeného objemu vzduchu, propojeného se zbytkem soustavy přechodovým otvorem (popř. pístem).

V prvním přiblížení můžeme předpokládat, že akustický odpor vyjadřuje vliv viskozity vzduchu, popsáný přímo úměrností mezi rozdíly tlaku na koncích „potrubí“ a objemovou rychlostí protékajícího vzduchu. To platí v případě, že v potrubí nejsou žádné překážky a proudění je tzv. laminární (k významu tohoto termínu se ještě vrátíme). Hmotnost vzduchu v potrubí se uplatňuje jako čistá hmotnost, po-

kud se v potrubí nestlačuje vzduch, což platí, pokud rychlost je podstatně menší, než je rychlost zvuku, délka potrubí podstatně kratší než vlnová délka (tato podmínka musí být splněna i pro ostatní prvky elektroakustické soustavy, má-li být řešitelná metodou analogie) a tření vzduchu o stěny je zanedbatelné (v případech pro nás zajímavých je to u kruhového potrubí přibližně od průměru 3 cm výše).

U poddajnosti je to trochu složitější. Stlačováním plynu v objemu se vykonává práce. Pokud je plyn (vzduch) v objemu dokonale tepelně izolován, zvětšuje se touto prací vnitřní energie plynu a jeho teplota stoupá. Zahříváním plynu stoupá jeho tlak, zvětšuje se jeho odpor vůči stlačení - atd. Jedná se o takzvaný adiabatický proces. Pokud se teplo v plynu vzniklé může někam odvést (např. do tlumící výplně - vaty apod.), může zůstávat teplota plynu téměř konstantní. Důsledkem je, že při stlačování izolovaného plynu je výsledná poddajnost menší (nárůst tlaku s ohřevem) než při stlačování s odvodem tepla. Přitom předpokládáme, že následnou expanzí se teplo opět uvolní, což však nemusí být pravda - teplo se může vytvářet třením plynu o výplň nebo jeho vířením (tedy vlastně třením plynu o sebe sama) a zpět už se nepromění (tzv. nevratný proces), takže např. postupným zahříváním se může poddajnost postupně zmenšovat - není to s ní tedy vůbec jednoduché.

Většinou se předpokládá, že stlačování je adiabatické, tedy s tepelnou izolací, což se objevuje v případných vzorcích pro výpočet (např. frekvence basreflexu, avšak o tom později), a odvod tepla plyn „změkčuje“, takže výsledný akusticky účinný objem může být větší než objem geometrický.

Zmínili jsme se o víření plynu a laminárním proudění. Tyto pojmy si zasluhují bližší pozornost. Říkáme, že proudění je laminární, pokud proudnice (proudová vlákna, přesněji trajektorie elementárních objemů tekutiny) na krátkých vzdálenostech probíhají víceméně rovnoběžně. Překročí-li se jistá hranice rychlosti, začnou se proudnice chaoticky proplétat, vznikají víry a pak hovoříme o proudění turbulentním.

Při turbulentním proudění už rychlost proudění (objemová rychlost) není přímo úměrná tlakovému rozdílu tak, jak to předpokládá definice akustického odporu. Jev turbulence je fyzikálně „zvnějšku“ poměrně dobře popsán (patří mezi klíčové jevy v aerodynamice letadel i automobilů), pokud jde však o jeho vnitřní zákonitosti a příčinné souvislosti, patří mezi ty velké záhady fyziky, kterými se zabývá teorie chaosu.

My se záhadám raději vyhneme a konstatujeme jen, že z praxe je známo, že turbulence vzniká při překročení tzv. kritického Reynoldsova čísla, což je u kruhově ohraničeného proudění součin průměru a rychlosti, dělený viskozitou. Kritická hodnota je přibližně 1000 a není obtížné vypočítat, že při pohybu membrány reproduktoru je tato hodnota překročena velmi snadno na nízkých kmitočtech a při malých průměrech membrány (kde je velká rychlost).

Při turbulentním proudění už plyn nevytváří akustický odpor, takže případná odvození vyzářovacích vlastností membrány (kterým jsme se zatím vyhnuli) ztrácejí do značné míry opodstatnění. Velmi intenzivní turbulence spojená s vytvářením vírů vzniká také při obtékání hran, tedy např. na okrajích membrány, u hlubokotónových reproduktorů pak zejména tehdy, je-li jejich okrajová vlnka vyduťtá. Výsledkem je samozřejmě další zkreslení a turbulenční víry se navíc projevují jako zdroje rušivých signálů (šumů, svistů apod.). Silné turbulence dále vznikají při průtoku vzduchu šterbinami a otvory v magnetickém obvodu reproduktoru, s čímž může souviset to, že reproduktory bez krycí „kopulky“ hrají „jinak“ (čistěji?) než ty obvyklé.

Výskyt turbulencí je tedy dalším argumentem pro používání basových reproduktorů, které mají spíše větší průměr (akustický výkon při dané výchlce se zvětšuje s čtvrtou mocninou průměru membrány, Reynoldsovo číslo se zvětšuje jen s první mocninou). Ještě lepší může být použít několik reproduktorů s menším průměrem, kdy celková plocha je dostatečně velká, avšak dílčí průměr připadající na reproduktor a určující tak velikost Reynoldsova čísla je menší, než by odpovídalo jednotlivému velkému reproduktoru o stejné ploše membrány. Zde už je však situace komplikovaná vzájemným ovlivňováním reproduktorů a příslušné aerodynamické problémy jsou teoreticky nezládnutelné.

(Pokračování příště - „Kolik membrán doopravdy potřebujeme?“)

Stavíme reproduktorové soustavy (XXVI)

RNDr. Bohumil Sýkora

V minulé části jsem na závěr položil řečnickou otázku - kolik membrán vlastně potřebujeme? Jára Cimrman by asi odpověděl - zkuste to bez membrány, milý Sýkoro! A věřte nebo nevěřte, ono to také jde. Existuje elektroakustický měnič zvaný ionofon, který se (zjednodušeně) skládá z kovového hrotu v drátěné klínce. Když se na hrot přivede dostatečně vysoké stejnosměrné napětí, vznikne kolem hrotu jehly koronový výboj, který vytvoří obláček ionizovaného vzduchu. Když se k stejnosměrnému napětí přičte střídavá složka, začne obláček pulzovat a vyzářuje zvukovou vlnu. Je to principiálně jednoduché, prakticky všesměrové, „chodí“ to do ultravysokých kmitočtů, avšak bohužel je to dost málo citlivé a vzhledem k tomu, že technologie zase není až tak snadná, jak by se mohlo zdát, taky „sakramentsky“ drahé. Nicméně ještě před pár lety (nevím, jak teď) tento záraz nabízel firma FANE.

Avšak zpátky k próze každodenního života. Naprostá většina konstrukcí reproduktorů používá membránu, i když ta nemusí vždy tvořit samostatný konstrukční díl - viz např. páskové reproduktory, u kterých je funkce membrány sloučena s funkcí kmitací cívky. Membrána, jak jsme si již označili, tvoří přechod z mechanické části reproduktoru na akustickou a je potřebné znát, jak funguje.

Fyzikálně je to celkem jednoduché, pokud uvažujeme o ideální pístové kruhové membráně, kterou tvoří nekonečně lehký a dokonale tuhý kotouč, pohybující se bez tření a současně s dokonalým utěsněním v odpovídajícím kruhovém výřezu nekonečně tuhé desky. Má-li taková membrána plochu S , pak do okolního prostředí (a to na obě strany desky nezávisle) pumpuje objemovou rychlost v_V , která je dána jako součin plochy membrány a její mechanické rychlosti. Přejdeme-li k harmonickému kmitání o frekvenci f a budeme se zajímat jen o amplitudy (tedy špičkové hodnoty časově proměnných veličin), pak objemová rychlost ve vztahu k výchylce membrány bude dána jako $v_V = 2\pi \cdot f \cdot y \cdot S$ nebo, jak je zvykem psát, $v_V = \omega \cdot y \cdot S$.

Membrána přitom funguje z hlediska přechodu z elektrické strany na akustickou také jako transformátor síly na tlak, tedy v analogii jakoby „napětíový“ transformátor s převodním poměrem $1/S$ - tady analogie malounko pokulhává, protože převodní poměr elektrického transformátoru je bezrozměrná veličina, avšak budete bez obav, funguje to. Přispěvek reakce vzduchu, tedy to, co označujeme jako vyzářovací impedance, můžeme pak přepočítat z akustické strany na mechanickou vynásobením S^2 .

Objemová rychlost v elektroakustické analogii odpovídá proudu a výkon, který předá do okolního prostředí, je analogicky elektrickému výkonu rovný součinu druhé mocniny rychlosti a reálné složky zatěžovací impedance. Zatěžovací impedance je v tomto případě tzv. vyzářovací impedance membrány, stanovená na základě velmi složitěho matematického od-

vození, které nebudeme uvádět (podrobnosti najdete např. v knize od prof. J. Merhauta „Teorie elektroakustických přístrojů“).

Pro naši potřebu stačí vědět, že pro nepřilíh vysoké kmitočty se vyzářovací impedance chová jako sériové spojení odporu

$$R_{AR} = \omega^2 \cdot \rho / (2\pi \cdot c_0),$$

který udává reálnou složku, a hmotnosti

$$m_{AR} = 8\rho / (3\pi^2 \cdot r),$$

která udává imaginární složku. V těchto výrazech r je poloměr membrány, ρ znamená hustotu vzduchu a c_0 rychlost zvuku. Odporová složka vyzářovací impedance je to, co od membrány přijímá akustický výkon, hmotnostní složka pak reprezentuje tzv. hmotu spolukmitajícího vzduchu. Tedy jakýsi balík vzduchu, který membrána posunuje sem a tam a který se uplatňuje jen jako přírůstek celkové hmotnosti kmitacího systému. Praktické výpočty ukazují, že vyzářování u běžných konstrukcí reproduktorů k celkové mechanické impedance systému přispívá celkem zanedbatelně (výjimku tvoří elektrostatické a „pravé páskové“ měniče). Z hlediska názornosti je poněkud nepřijemné, že vyzářovací odpor je úměrný druhé mocnině kmitočtu. Z praktického hlediska je to však naopak velmi dobře a hned si řekneme proč.

Pohyb membrány je buzen silou, působící na kmitačku, a rychlost je dána poměrem síly a mechanické impedance. V oblasti pod rezonančním kmitočtem je výchylka určena rovnováhou mezi touto silou a reakcí tuhosti kmitacího systému (silou stlačujeme pružinu, velikost stlačení je úměrná síle). Nad rezonančním kmitočtem je pohyb membrány určen rovnováhou mezi budící silou a silou setrvačností reakce kmitacího systému (tady už samozřejmě neuvažujeme o nehmotném pístu). Setrvačná síla je úměrná součinu hmotnosti membrány a zrychlení, zrychlení membrány ve vztahu ke kmitočtu a rychlosti pohybu membrány je pak dáno jako $a = \omega \cdot v$ a vztah mezi silou a rychlostí má tvar $v = F / (\omega \cdot m)$, který už by vám mohl být povědomý, protože je to vlastně jeden ze vztahů, na kterých se zakládá elektromechanická analogie. Pro výpočet akustického výkonu potřebujeme znát druhou mocninu objemové rychlosti, a ta je dána jako

$$v^2 = S^2 \cdot F^2 / (\omega^2 \cdot m^2),$$

takže pro výsledný akustický výkon platí:

$$p_A = S^2 \cdot F^2 \cdot \rho / (2\pi \cdot c_0 \cdot m^2).$$

Jelikož se kmitočtově závislé členy vykrátí, je výsledný akustický výkon úměrný druhé mocnině síly, ta je bez kmitočtové závislosti úměrná proudu a ten je zase - alespoň v jisté části kmitočtového pásma - úměrný napětí, případně podílu napětí na kmitačce a její jmenovité impedance. Takže výsledný akustický výkon je (nebo alespoň měl by být) nezávisle na kmitočtu úměrný druhé mocnině napětí na kmitačce. To je ten malý zárazk přírody, na kterém je založena funkce dynamického reproduktoru. Neplatí však bohužel zcela bezvýhradně. V oblasti rezonance reproduktoru je mechanická im-

pedance systému dána podstatně složitějším vztahem a pod rezonancí je síle úměrná výchylka, nikoli zrychlení, takže rychlost je přímo úměrná kmitočtu a výkon je přímo úměrný čtvrté mocnině kmitočtu. U středních kmitočtů narůstá impedance kmitačky vlivem její indukčnosti, takže výkon by zde měl mít klesající tendenci. Zde se však uplatňuje vliv (obvykle) kuželového tvaru membrány, který způsobuje, že vyzářovací impedance je poněkud větší, než by měla být podle teorie tuhého kotouče, čímž se nárůst elektrické impedance přibližně kompenzuje. A pak existuje oblast, ve které se odporová složka vyzářovací impedance začíná blížit velikosti hmotnostní složky, a zde (teorií odvozeno, praxí potvrzeno) přestávají platit výrazy pro vyzářovací odpor a hmotnost, kterých jsme použili pro odvození vztahu pro výkon. Membrána se začíná chovat podstatně složitěji a důležité je, že směrem k vyšším kmitočtům se již vyzářovací odpor dále nezvětšuje, takže při konstantním napětí na kmitačce vyzářený výkon začne rychle klesat. Jedná se o oblast, kde poměr membrány přibližně odpovídá čtvrtině vlnové délky vyzářovaného zvuku.

Někdy se hovoří o tzv. kritické frekvenci membrány, dané vzorcem $f_K = K/r$, kde r je poloměr membrány a K konstanta, která může být definována podle různých kritérií, takže její hodnota se pohybuje v rozmezí zhruba od 55 do 115. Kritičnost této frekvence však neznamená, že nad ní by reproduktor přestal pracovat. On si pracuje vesele dál, avšak jeho vyzářování začíná být směrové, vyzářený výkon se koncentruje k ose membrány a tento efekt prakticky přesně kompenzuje pokles výkonu, pokud jde o frekvenční charakteristiku měřenou na ose reproduktoru.

Osová amplitudová charakteristika tedy může být víceméně vyrovnaná i dosti vysoko nad kritickou frekvencí, výkonu se již ovšem nedostává a to má různé dopady na charakter zvuku, pokud je reproduktor poslechově hodnocen v podmínkách, ve kterých se uplatňují odrazy zvuku.

Praktický příklad: basový reproduktor o jmenovitém průměru 17 cm má účinný poloměr membrány asi 7 cm. Použijeme-li neoptimističtější hodnotu konstanty K , znamená to, že by neměl být používán na kmitočtech vyšších než asi 1640 Hz. Ve skutečnosti bývá hranice použitelnosti reproduktoru poněkud vyšší. To je dáno tím, že ohybové vlnění membrány, které ji fakticky uvádí do pohybu, je tlumeno směrem od středu k okrajům membrány. Následkem toho se u vyšších frekvencí reproduktor chová, jako by měl menší průměr.

Míra tlumení se dá ovlivnit volbou materiálu membrány, různými nátěry a podobně, takže v příznivých případech lze reproduktor používat až do dvojnásobku kritické frekvence. Paradoxní je, že různé exkluzivní konstrukce na bázi kevlaru, uhlíkových vláken, „sendvičových“ uspořádání apod., které mají za cíl potlačit vlastní ohybové kmitání (vliv vlastních módů) membrány, tento efekt rovněž potlačují, takže u takto konstruovaných reproduktorů je nutné brát omezení na kritickou frekvenci vážněji než u konstrukcí „obyčejných“. U těch se pro uvedený příklad (s přimhouřením obou očí) dá počítat s omezením na - řekněme - 2,5 až 3 kHz. A co potom?

Inu, další membrána, milý Cimrmane!

(Pokračování příště - „Další membrány...“)

Stavíme reproduktorové soustavy (XXVII)

RNDr. Bohumil Sýkora

„Tak jak je to s těmi membránami, milý Cimrmane?“ Kdo četl pozorně předcházející díly (anebo je informován odjinud), ten zná odpověď podloženou alespoň kvalitativně. Pro skutečně dobrou reprodukci potřebujeme membrány nejméně dvě. Jedna musí být dost velká, aby dokázala vyzářit basy, a druhá zase dost malá, aby neměla problémy u výšek.

Zásadním problémem u výšek je totiž jednak hmotnost kmitacího systému, který nesmí být příliš těžký, pokud má dosahovat rozumné citlivosti, a jeho rozměry také nesmějí být příliš velké, aby jeho kritická frekvence ležela alespoň někde kolem 10 kHz. Pokud by měla ležet u 20 kHz, vycházel by průměr membrány kolem 1 cm, a to už je trochu málo s ohledem na citlivost (proč, to si řekneme později). Zdá se, že vysokotónové reproduktory s průměrem membrány 19 až 25 mm představují rozumný kompromis. Pokud jde o středy, je to s dvěma reproduktory také jen kompromis, avšak většinou se dá nějak zařídit, aby se o tuto oblast „výškáč“ s „basákem“ nějak rozumně podělily. Ti nejskalnější hifisté jsou ostatně přesvědčeni, že čím méně reproduktorů, tím lépe, a mají svým způsobem pravdu. Je totiž účelné, aby pásmo zhruba 300 Hz až 3 kHz vyzářoval jeden měnič. Toto pásmo je důležité pro tvorbu barvy zvuku a lokalizaci, takže pokud je má na starosti jediný měnič (u dvoupásmové soustavy basový), může být výsledný zvukový dojem velmi konkrétní a kompaktní. Nutno ovšem podotknout, že přílišná konkrétnost a kompaktnost se nemusí každému líbit, protože dává méně výraznou iluzi zvukového prostoru, takže někteří výrobci dělají speciální opatření pro to, aby dojem prostorovosti zvýraznili - samozřejmě na úkor přesnosti lokalizace atd. Inu, někdo rád vdolky... Avšak zpátky k membránám. Nebude na škodu, když se trochu vrátíme k otázce vyzářovací impedance.

Minule jsme si řekli, že zatížení membrány vzduchem, do kterého vyzářuje, se dá popsat akustickou vyzářovací impedancí, tvořenou sériovým spojením hmotnostní a odporové slož-

ky, přičemž pro kmitočty dostatečně nižší, než je kmitočet kritický, je odporová složka přímo úměrná druhé mocnině kmitočtu. Na mechanickou stranu se tyto složky převádějí transformací v poměru S^2 , kde S je plocha membrány. Membrána je kruhová o poloměru r , její plocha je πr^2 a tak se nám na mechanické straně objeví sériové spojení hmotnostní složky:

$$m_{MR} = 8 \cdot r^3 \cdot \rho / 3 \text{ a odporové složky } R_{MR} = \omega^2 \cdot \pi^3 \cdot r^4 \cdot \rho / (2 \cdot c_0)$$

Zatím je to stále ještě dosti abstraktní, avšak když se trochu blíží podíváme na výraz popisující hmotnostní složku, zjistíme, že se vlastně jedná o vyjádření hmotnosti vzduchu o objemu odpovídajícímu válci s poloměrem r a výškou $8r/3\pi$. To je tak zvaný spolukmitající sloupec vzduchu, o kterém jsme se již zmiňovali a se kterým se setkáme ještě vícekrát. Mechanické složky vyzářovací impedance bychom mohli doplnit do náhradního schématu reproduktoru, avšak pořád je tu ta nepřijemná záležitost s kmitočtově závislým odporem. Existuje však jedno elegantní řešení, kterým se jí můžeme vyhnout. Můžeme totiž sériové spojení právě uvedených mechanických impedancí nahradit hmotnostní impedancí paralelní spojenou s odporem, přičemž platí, že hmotnost je táž jako v původním sériovém zapojení. Odpor je však jiný, je kmitočtově nezávislý a jeho hodnota je dána výrazem:

$$r_{MP} = 128 \cdot r^2 \cdot c_0 \rho / (9\pi)$$

Kdyby popsaná záměna platila přesně, pak by dostatečně vysoko nad kritickou frekvencí měla na mechanickou stranu přepočtená vyzářovací impedance přibližně charakter odporu o velikosti rovné r_{MP} . Platí to však jen zčásti, odporový charakter impedance skutečně dosti přesně má, jeho hodnota se však blíží součinu $\pi r^2 c_0 \rho$.

S tím si však nemusíme lámat hlavu. Jednak se paralelní spojení hmotnosti a odporu vůbec nedá fyzikálně realizovat (funguje to jen v modelu), jednak se nad kritickou frekvencí vyzářování reproduktoru řídí v praxi jinými pravidly, uplatňují se zde vlastní ohybové kmity membrány, difrakční jevy na okrajích reproduktoru a tak dále a tak dále. Podstatné je, že pro nízké kmitočty můžeme sestavit náhradní schéma reproduktoru, jehož mechanická část má podobu podle obr. 1 a po převedení gyrátorem na stranu elektrickou dostaneme schéma podle obr. 2 (zde zanedbáváme in-

dukční chování kmitací cívky). Možná to všechno vypadá tak trochu jako hračkaření, avšak náhradní schémata se mohou například použít v některém z programů pro analýzu obvodů a o chování reproduktoru se pak můžeme dozvědět dosti podstatné věci jen na základě znalosti jeho mechanických parametrů.

Z tohoto hlediska je zajímavé dozvědět se něco o vlivu ozvučnice na (zpravidla) basový reproduktor. To se cestou náhradního schématu dá zrovna řešit poměrně snadno. Tuhost vzduchu v ozvučnici se projeví jako přídavná sériová kapacita ve schématu na obr. 1, po přepočtu pak jako přídavná paralelní indukčnost na obr. 2. Ztráty způsobené vyplněním ozvučnice tlumícím materiálem popíše další sériový odpor na obr. 1 (a samozřejmě další paralelní na obr. 2). Pokud je ozvučnice tlumícím materiálem vyplněna jen zčásti, můžeme to interpretovat tak, že přídavnou sériovou tuhost rozdělíme na dvě paralelní složky a do série s jednou z nich zapojíme odpor, což se v elektrickém schématu... ale radši přibrzdíme.

Na obr. 3 je náhradní schéma basreflexové ozvučnice, ve kterém jsou tentokrát již jen slovně popsány jednotlivé složky. Číselné hodnoty se dají odvodit z parametrů ozvučnice a reproduktoru, potíží je však s hodnotami tlumících odporů, které se proto většinou jen odhadují nebo obcházejí zaváděním různých činitelů tlumení.

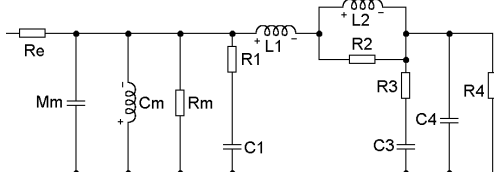
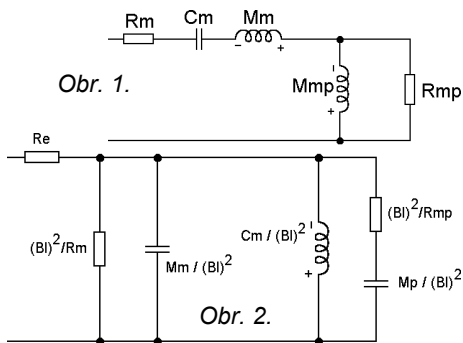
V jednodušší verzi náhradního schématu podle obr. 2 se dá celkem snadno zjistit i vyzářená akustická výkon. Ten odpovídá výkonové ztrátě na odporu $(B_l)^2 / R_{MP}$. U basreflexu by to bylo složitější, tam se totiž sčítají akustické tlaky signálu vyzářeného membránou a signálu vyzářeného nátrubkem, přičemž je nutné mít na paměti, že nátrubek je buzen opačnou stranou membrány a tudíž v opačné polaritě.

Věc je o to komplikovanější, že vyzářovací parametry nátrubku jsou vztaheny k jeho poloměru a příslušné hodnoty ve schématu se musí zjišťovat přepočtem. Avšak do takových podrobností nebudeme zabíhat. Basreflexový otvor - jak vidno - uvažujeme také jako membránu, která vyzářuje ty nejnižší kmitočty, takže když postavíme dvoupásmovou soustavu s basreflexem, máme vlastně jakoby tři membrány. A věřte nebo nevěřte, ve firemní literatuře jsem se kdysi u jisté docela obyčejné malé basreflexové soustavy od jisté velmi známé firmy setkal s tvrzením, že se jedná o velmi novátorské řešení akusticky třípásmové soustavy!

(Pokračování příště:

„Kam s těmi membránami?“)

Obr. 3. (R_e - odpor kmitačky, M_m - hmotnost kmitacího systému, C_m - poddajnost kmitacího systému, R_m - mechanické tlumení kmitacího systému, R_1 , C_1 - složky vyzářovací impedance membrány, L_1 - poddajnost netlumené části ozvučnice, L_2 - poddajnost tlumené části ozvučnice, R_2 - tlumení ozvučnice, R_3 , C_3 - složky vyzářovací impedance basreflexového otvoru (resp. vyústění nátrubku), C_4 - hmotnost vzduchu v nátrubku, R_4 - ztráty v nátrubku vzniklé prouděním vzduchu)



Stavíme reproduktorové soustavy (XXVIII)

RNDr. Bohumil Sýkora

Takže ještě jednou, jak je to s těmi membránami? Posledně jsem skončil s tím, že si povíme, kam s nimi. Bohužel existuje jeden nemilosrdný zákon (ani ne tak přírodní, jako spíše z „Murphyovské“ kategorie), který praví, že kdykoli chceme něco začít dělat, musíme před tím udělat ještě něco jiného. Takže dříve, než se začneme zabývat umístěním membrán, musíme si říci pár slov o zákonitostech, které nás při tomto počínání vedou.

Jedno z dosti zásadních pravidel akustiky, které je zcela exaktně vědecky odvoditelné, říká, že máme-li více než jeden zdroj zvuku, pak okamžitý akustický tlak kdekoli v prostoru soustavou zářičů vyprodukovaný se rovná součtu okamžitých hodnot produkovaných jednotlivými zářiči (platí samozřejmě za předpokladu, že nevznikají nelineární efekty, tedy pro nepříliš velké akustické tlaky - s hladinami asi do 120 dB). Pro další výklad budeme nejdříve předpokládat, že všechny zúčastněné zářiče produkují harmonický signál o stejné frekvenci. Pak si můžeme chování soustavy ilustrovat několika jednoduchými příklady. Jsou-li zářiče dva, jsou velmi blízko sebe (tedy jejich vzdálenost je velmi malým zlomkem vlnové délky - dejme tomu ne více než desetina) a nesměrově vyzářují signál o stejné amplitudě a fázi, pak taková dvojice vytváří akustický tlak rovný dvojnásobku tlaku, který by vytvářel jeden zářič sám o sobě. Ten dvojnásobek bude platit jak pro hodnotu okamžitou, tak pro efektivní, střední a podobně.

Jsou-li fáze signálů shodné a amplitudy různé, je výsledná amplituda prostým součtem dílčích amplitud. Jsou-li amplitudy stejné, avšak fáze různé (tj. signály jsou proti sobě fázově posunuté o konstantní úhel ϕ), pak už sčítání není tak jednoduché, protože okamžité hodnoty dílčích tlaků se nerovnájí a nemají konstantní

poměr. Výsledná amplituda (tj. maximální hodnota) bude rovna dvojnásobku amplitudy příslušející jednomu zářiči, vynásobenému kosinem poloviny fázového rozdílu. A fáze výsledného signálu bude oproti jednomu z dílčích signálů posunuta o $\phi/2$, oproti druhému pak o $-\phi/2$. Pokud by byly fáze i amplitudy různé, bylo by to už poněkud složitější počítání a má-li někdo zájem, může si příslušné vztahy odvodit na základě trigonometrických formulek z některé sbírky matematických vzorců.

Pro nás je důležitá trochu jiná věc. Pokud v prostoru okolo dvou zářičů bude akustické pole s dvojnásobkem amplitudy (případně efektivní hodnoty) jednoho zářiče, pak vzhledem k tomu, že vyzářená akustická intenzita je úměrná druhé mocnině akustického tlaku a všude kolem předpokládané dvojice je tato intenzita stejná (nesměrově vyzářování!), pak celkový vyzářený akustický výkon bude rovný čtyřnásobku výkonu, který by za stejných podmínek vyzářil jeden zářič. Vlastně to znamená, že zdvojením zářiče se zdvojnásobí jeho účinnost. A to skutečně funguje i v praxi, pokud jsou splněny výchozí podmínky, tj. zářiče jsou blízko sebe a vyzářují signál o stejné amplitudě a fázi.

Pokud zářiče blízko sebe nejsou, což se dá říci zhruba tehdy, jsou-li od sebe vzdáleny čtvrtinu vlnové délky nebo více, situace se dosti významně komplikuje. Mezi signály, vyzářovanými jednotlivými zářiči, se objevuje fázový posuv, který závisí na tom, ve kterém směru chování soustavy zářičů posuzujeme. Vzdálenost zářičů, která se do daného směru promítá, způsobuje, že signály přicházejí od zářičů do pozorovacího, případně měřicího (poslechového) bodu s různými zpožděními a tudíž různými fázovými posuvy. Výsledná soustava se tedy začíná chovat směrově, i kdyby zářiče samy o sobě byly nesměrové (jako že obvykle nejsou). Akustické tlaky se v některých směrech sčítají, v jiných odečítají a výsledkem je, že za určitou hranici pro vzdálenost (prakticky zhruba čtyřnásobek vlnové délky) je výsledný vyzářený akustický výkon dán jako součet akustických výkonů vyzářených jednotlivými zářiči, takže se citlivost nezvětšuje. Pro ilustraci je na obr. 1 uveden svislý řez směrovou charakteristikou dvojice zářičů (se stejnou amplitudou a fází), vzdálených od sebe šestinásobek vlnové délky, což např. pro kmitočet 10 kHz znamená asi 20 cm.

Avšak proč se o tom vůbec bavíme? V běžných poslechových podmínkách přijímá ucho nejprve tzv. přímý zvuk, což je

signál, šířící se od zdroje zvuku k uchu nejkratší možnou cestou, tedy nejsou-li mezi zdrojem a uchem nějaké překážky, prakticky přímočaře. Jeho úroveň je dána akustickým tlakem, který zdroj (reproduktorová soustava) vyprodukuje v daném směru. V běžných poslechových podmínkách, jaké najdeme např. v místnostech, však do ucha přicházejí další signály, které se tam dostávají odrazem od okolních předmětů, stěn, stropu, podlahy atd. Tyto signály přicházejí s různým zpožděním a mají různý vliv na to, jak sluchový orgán výsledný signál vyhodnotí.

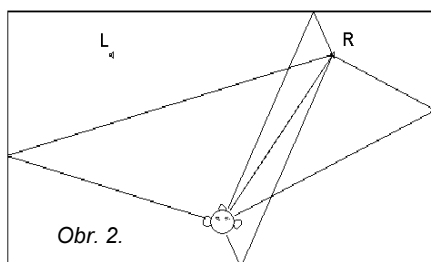
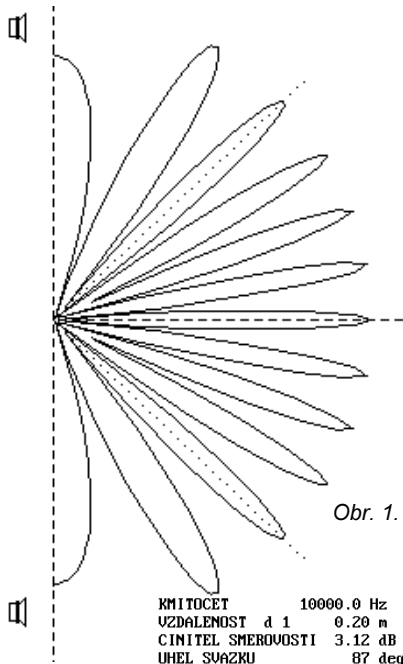
Všechny souvislosti ještě nejsou dokonale probádané, zhruba však platí, že pro zpoždění do 30 ms zpožděné signály splývají se signálem přímým a pouze ovlivňují jeho subjektivně vnímanou hlasitost - obecně ji zvětšují, i když míra zvětšení není dána žádným jednoduchým vztahem. Pro zpoždění nad zhruba 80 ms zpožděné signály už spíše jen charakterizují prostor, v němž se poslouchání odehrává, mohou ovlivnit srozumitelnost či „průzračnost“, avšak již např. nemají tak velký vliv na hodnocení barvy zvuku. A mezi uvedenými zpožděními se různou měrou uplatňují oba mechanismy. Zkrátka něco mezi. Podstatné je, že jak na vnímanou hlasitost, tak na barvu zvuku má vliv zvuk přímý i odražený.

Poměr mezi intenzitou zvuku přímého a odraženého určují dva hlavní faktory. Prvním jsou směrové vlastnosti zářiče. Čím více zvukové energie je vysláno mimo dráhu přímého zvuku, tím větší šance je, že se do ucha dostane také nějaký ten zvuk odražený. A druhým jsou akustické vlastnosti poslechového prostoru. Čím je interiér poslechového prostoru odrazivější (což do značné míry odpovídá tomu, že má delší dobu dozvuku, avšak detaily prostorové akustiky zatím vynecháme), tím větší podíl zvuku vyzářeného mimo přímý směr se k uchu může dostat.

Kromě toho, že odražené signály mohou ovlivnit barvu zvuku, mohou mít značný - zpravidla negativní - vliv na lokalizaci ve stereofonním obraze. Zhoršení ostrosti lokalizace má však obecně za následek sice jisté „rozmazání“ virtuálních zdrojů zvuku v prostoru, ale také lepší „vyplnění zvuku prostorem“, čehož někteří výrobci reproduktorových soustav využívají a konstruují je záměrně tak, aby za cenu zhoršení lokalizace vytvářely lepší iluzi prostorovosti zvuku. Co je správné, o tom rozhoduje vkus posluchače. Na obr. 2 je schematicky znázorněn chod odražených paprsků prvního řádu. Je zřejmé, že do levého ucha se odrazem dostávají paprsky z pravého reproduktoru, což má samozřejmě vliv na lokalizaci a obecně platí, že v prostorech s delším dozvukem je lokalizace horší, avšak prostorovost lepší (a naopak).

A jak je to tedy s tím umístěním membrán? Ideální by bylo, kdyby středy reproduktorů sousedních pásem nebyly od sebe vzdáleny více než čtvrtinu vlnové délky na dělicí frekvenci. To se dá splnit u třípásmové soustavy mezi basovým a středotónovým reproduktorem, kde dělicí frekvence bývá kolem 500 Hz, vlnová délka tedy asi 68 cm, její čtvrtina 17 cm a rozteč 17 cm mezi basovým a středovým reproduktorem je celkem reálné dosažitelná. Mezi středovým a výškovým reproduktorem, popř. v dvoupásmové soustavě složené z basového a výškového reproduktoru to ovšem možné není, a pak nastupují jiná kritéria, o nichž si povíme příště.

(Pokračování příště)



Stavíme reproduktorové soustavy (XXIX)

RNDr. Bohumil Sýkora

Při konstrukci reproduktorových soustav stejně jako v jiných oborech platí, že při řešení nějakého problému nemusí být největším problémem nalézt řešení, ale správná formulace problému (ta čeština, to je věc). Tím jsem ocitoval klasika - nevím bohužel, kterého - z jiného oboru, avšak v akustice uvedený výrok platí s hrůzostrašnou důsledností. Tak třeba: Jak má vypadat správná kmitočtová charakteristika? A ostatně, co je to vůbec věrná či kvalitní reprodukce? Z praxe je známo, že reproduktorové soustavy s podobnými nebo skoro stejnými frekvenčními charakteristikami mohou znít velmi rozdílně a stále se ještě neví ani zdaleka všechno o tom, proč tomu tak je.

Zde bych si dovolil malou terminologickou odbočku - možná se budu opakovat, avšak to nemusí být na škodu. Stalo se zvykem ztotožňovat pojmy měření a objektivní hodnocení, a na druhé straně poslechové hodnocení a subjektivní hodnocení. To je ovšem zásadní nedorozumění. Objektivní hodnocení na základě měření může vycházet například z toho, zdali se daná amplitudová charakteristika vejde či nevejde do jistého tolerančního pole. Výsledek takového hodnocení - vejde, nevejde - je zcela jednoznačný a nezávislý na tom, kdo si danou charakteristiku zrovna prohlíží. Ovšem ono toleranční pole kdysi někdo stanovil, a byl to taky jenom člověk. Na základě čeho je stanovil? Nejspíše na základě dlouhodobé zkušenosti mnoha jedinců, zabývajících se studiem souvislosti mezi výsledky poslechových hodnocení a měření. Poslechové hodnocení provedené jedním hodnotitelem je zcela nepochybně subjektivní, avšak když se takových hodnocení sejde více a alespoň trochu se shodují, je možné brát je jako přinejmenším do jisté míry na subjektu nezávislá a tudíž objektivní.

Naproti tomu, pokud při hodnocení na základě měření postupují tak, že se ostřížím zrakem podívám na křivku a řeknu - ta je dobrá - a myslím tím - ta se mi líbí, postupují naprosto subjektivně a mé hodnocení se dá brát jako objektivní pouze do té míry, do jaké míry se dá brát vážně moje zkušenost (pozor, nezaměňovat za autoritu!) s takovýmito hodnoceními.

Problém je samozřejmě také v tom, že ona dílčí subjektivní hodnocení, na jejichž základě se vytvářejí kritéria braná za objektivní, jsou poplatná době, jinými slovy mění se s časem, takže to, co bylo považováno za kvalitní před dvaceti lety, by dnes mohlo zcela propadnout - anebo naopak (příčez první varianta se dá prověřit, druhá bohužel nikoliv, ježto reproduktory z doby před dvaceti lety možná seženeme, avšak s posluchačstvem to bude horší).

Tak jsem to všechno pěkně zamotal a asi bych měl dojít k nějakému morálnímu ponaučení. To je celkem jednoduché - pokud jsem v tomto seriálu něco tvrdil nebo budu tvrdit o kvalitě a tvářit se přitom, že toto tvrzení má objektivní platnost, pak to (alespoň doufám) platí pro dobu, kdy tento seriál vzniká (v tomto konkrétním případě 10. ledna roku 2000 kolem půl páté ráno) a nějaký ten časový interval před a po (opět alespoň doufám, že víc než plus minus rok), avšak rozhodně ne odjakživa dojakživa. Víceméně trvalou platnost mají nějaké ty vzorečky, založené na fyzice, ale i ta se s časem mění, i když v průměru rozhodně pomaleji, než momentální vkus hudbymilovného, hifimilovného, případně - nedej Bůh - high-end-milovného publika.

Avšak abychom se vrátili k něčemu konkrétnějšímu. Minule jsem slíbil, že prozradím něco o zákonitostech použitelných pro volbu vzdáleností reproduktorů, pokud nemohou být „dostatečně blízko“. Opět je ovšem potřeba udělat ještě něco před tím. Daná problematika úzce souvisí se směrovými vlastnostmi soustav zářičů a pokud si předvezme, že se budeme alespoň snažit o něco jako objektivitu, musíme stanovit kvantitativní parametry, o které bychom se mohli opřít.

Základním parametrem pro popis směrového chování reproduktorů je činitel směrovosti, popřípadě index směrovosti. Při jeho definici se nejprve vychází z chování bodového zářiče nesměrově (izotropně) vyzařujícího do volného, tedy celého prostoru. Jestliže takový zářič ve vzdálenosti r produkuje akustický tlak p , pak celkový akustický výkon jím vyzařovaný činí $4\pi \cdot r^2 \cdot p^2 / (\rho \cdot c_0)$, kde p je hustota vzduchu a c_0 - jako obvykle - rychlost zvuku. Jestliže chceme zkoumat směrové vlastnosti nějakého zářiče, musíme nejprve definovat jeho referenční osu. Název osa vlastně není zcela přesný, neboť se jedná

o polopřímku s počátkem v referenčním bodě zářiče, který je (nebo by měl být) definován výrobcem, stejně jako orientace referenční osy vůči zářiči. Pokud takové informace nejsou k dispozici, musíme si je nějak domyslet. U klasického dynamického reproduktoru s „kuželovou“ membránou se jako referenční bod bere obvykle střed kruhu, tvořícího akustický výstup reproduktoru, a referenční osa je ta část osy symetrie reproduktoru, která směřuje „ven“. Jen tak mimochodem, charakteristická citlivost reproduktoru se udává jako akustický tlak na této ose ve vzdálenosti jednoho metru od referenčního bodu při jistém zdánlivém příkonu (zpravidla 1 VA - připomínám, že zdánlivý příkon rovná se napětí na druhou dělené jmenovitou impedancí reproduktoru).

Pokud reproduktor vyzařuje s nějakou směrovou závislostí, pak pro celkový jím vyzařovaný výkon už neplatí výše uvedený vzoreček. Zpravidla je tento výkon menší (i když výjimky existují) a poměr mezi teoretickým výkonem vypočteným z akustického tlaku na ose a skutečným vyzařeným výkonem, to vše vyjádřené v decibelech, udává index směrovosti. U nesměrového zářiče je index směrovosti rovný nule, u zářiče vyzařujícího do poloprostoru jsou to 3 dB (to platí např. v jistém kmitočtovém pásmu pro reproduktor v ozvučnici s velkými rozměry přední stěny - velké rozumí se ve srovnání s rozměry reproduktoru samotného, případně jeho membrány, typicky tedy pro vysokotónový reproduktor). U reproduktoru s konečnými rozměry membrány začíná směrové chování v blízkosti kritické frekvence membrány a index směrovosti může pro vysoké kmitočty nabýt značných hodnot, avšak v těchto oblastech se reproduktory pro hifi soustavy již nepoužívají. Naproti tomu u reproduktorů pro ozvučování velkých prostorů nebo prostranství bývá směrové vyzařování žádoucí, takže např. u reproduktorů se zvukovody se index směrovosti může blížit hodnotě 20 dB (viz tzv. horna 20 x 40 stupňů).

Nu a když je reproduktorů více, pak se situace dále komplikuje. Reproduktory jsou od sebe oddáleny, jejich vzdálenost se do různých směrů promítá různě (např. na ose dvojice bodových zářičů je velikost tohoto průmětu nulová, zatímco na přímcce procházející oběma zářiči kolmo k jejich osám je tento průmět rovný právě vzdálenosti zářičů). Následkem toho mají signály přicházející z jednotlivých zářičů různé časové zpoždění, vznikají fázové rozdíly, tlaky se nescítají aritmeticky atd. atd.

V podrobnostech je to značná věda, to jsem naznačil již minule, a ještě jsme s tím zdaleka neskoncovali, avšak pro ilustraci uvádím alespoň jeden obrázek. Na něm je plnou čarou vynesena kmitočtová závislost indexu směrovosti dvojice bodových zářičů, vzdálených od sebe tak, že tato vzdálenost je na kmitočtu 1 kHz právě polovinu vlnové délky (tedy přibližně 17 cm). Přerušovaná čára se týká něčeho trochu jiného. Pokud si vzpomenete na „rozkvetlou“ směrovou charakteristiku dvojice zářičů, uvedenou v minulé části, jistě pochopíte, že větší činitel směrovosti nemusí nutně znamenat něco jako soustředění výkonu do jednoho směru; v uvedeném případě by při vyzařování do poloprostoru byl činitel směrovosti přibližně 6 dB, a přesto o nějakém soustředění nemůže být řeč. Přerušovaná čára proto udává cosi jako „úhel otevření charakteristiky“, tato veličina se však běžně nepoužívá a nebudeme se jí dále zabývat.

(Příště: Pokračujeme ve směrování...)

