

René Drtina - Jaroslav Lokvenc - Tomáš Provazník - Michal Švandrlík

Katedra technických předmětů, Pedagogická fakulta, Univerzita Hradec Králové
Department of Technical subjects, Faculty of Education, University of Hradec Kralove

Abstrakt: Článek se zabývá principiálním řešením ozvučovacích soustav velkých auditorií (učebny a přednáškové sály). Uvádí výhody, nevýhody a podmínky funkce jednotlivých typů ozvučovacích soustav, způsob řešení i specifické požadavky pro velké ozvučovací systémy. Osmá část je věnována problematice směrových charakteristik reproduktorových sloupů.

Abstract: This article deals with the fundamental solution of the sound systems for large areas (schoolrooms and lecture auditoriums). It shows advantages, drawbacks and conditions for their capacity of single types of the sound system, ways of solving and specific requirements for large sound systems. The eighth part concerns the problems of directional characteristics of the column speaker.

Klíčová slova: Směrová charakteristika, reproduktorový sloup, ozvučovací soustava.

Keywords: Directional characteristics, column speaker, sound system.

ÚVOD K OSMÉ ČÁSTI

Seznámení se směrovými akustickými zářiči typu reproduktorového sloupu bylo uvedeno v [1]. K tomuto tématu jsme se vrátili o rok později v souvislosti s hledáním příčin nepřiliš uspokojivého zvuku malých reproduktorových sloupů, dodávaných pod různými označeními řadou obchodních a montážních firem [2].

V roce 2011 jsme s finanční podporou projektu specifického výzkumu Predikce směrových charakteristik skládaných akustických zářičů a možnosti jejich využití pro ozvučovací systémy učeben mohli detailně popsat vlastnosti námi upravených reproduktorových sloupů DPT 208. Cílem výzkumu bylo ověřit soulad teoretických předpokladů s reálnými vyzářovacími charakteristikami reproduktorových sloupů a z nich skládaných zářičů. Reproduktorové sloupy jsou totiž neprávem opomíjené zářiče, s příznivými akustickými vlastnostmi.

Učebny a posluchárny obvykle patří mezi prostory bez akustických úprav, které jsou převážně tlumeny pouze přítomností žáků. Akustické prostředí je tak poměrně proměnlivé, s nadlimitní dobou dozvuku a energetickou převahou v dolní části spektra. Výsledky rozsáhlého výzkumu v oblasti přenosových vlastností učeb-

ben ve většině případů ukázaly nevyhovující parametry, kdy se srozumitelnost řeči pohybuje pod úrovní 90 %.

UČEBNA NENÍ OBÝVACÍ POKOJ

Ozvučování učeben a poslucháren patří ke specifickým úkolům elektroakustiky. Předcházet by mu však měla akustická příprava prostoru. Zejména úprava doby dozvuku a vyrovnání dozvukového spektra, přičemž za hlavní hodnotící parametr akustiky učebny lze považovat dokonalou srozumitelnost řeči, nastavení ozvučení na hlasovou podobu a s tím související minimální sluchovou únavu. Výsledky námi provedených měření ukazují, že řada ozvučovacích systémů poslucháren není podložena projektem a měřením. Jsou používány nevhodné, ale i chybně instalované komponenty a ani drahé řešení není nutně zárukou kvality. To vyplývá i z analýzy projektů FRVŠ za posledních pět let, kde některé návrhy (nebo dokonce realizace) představují nejen principiálně špatné řešení, ale i plýtvání finančními prostředky.

Typickým příkladem může být používání systémů domácího kina pro ozvučení velkých poslucháren. I v případě špičkových domácích zařízení se stále jedná o komerční techniku, která

není určena pro jiné použití [3]. Problémem je především výkonové dimenzování zářičů (reproduktorů) v soustavách, které je u profesionálních systémů podstatně vyšší, dimenzování výkonových zesilovačů, ale i další doplňkové funkce těchto zařízení. Zásadní rozdíl je v tom, že úkolem domácích zařízení je ozvučit plochu o velikosti několika metrů čtverečních, pro 4-8 osob. Multiformátový reciver Onkyo TX-NR 808 je příkladem špičkového zařízení pro domácí kino (obr.137). Tak ho také výrobce deklaruje a v manuálu udává pravdivé parametry.



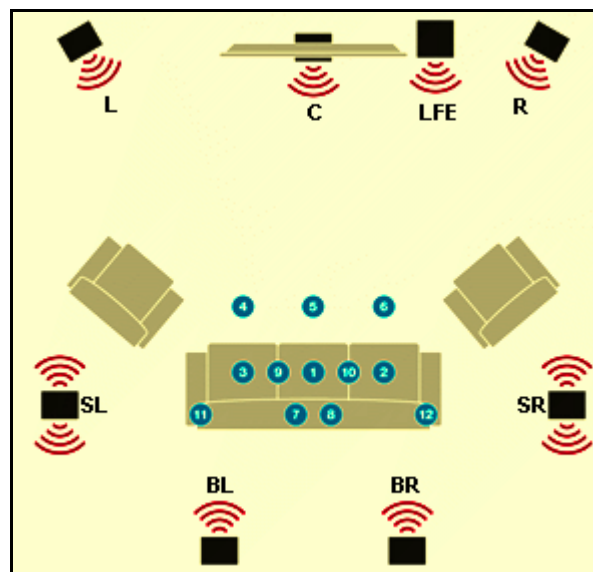
Obr.137 Reciver Onkyo TX-NR 808

Zatímco naši prodejci uvádějí v nabídce výkon $7 \times 180 \text{ W}$, výrobce udává 180 W při vybuzení jen jednoho kanálu [4], celkový výstupní výkon tedy rozhodně není vypočtených $1\,260 \text{ W}$.

Také certifikace THX Select2, kterou reciver má, jej určuje pro pozorovací a poslechovou vzdálenost 3-4 m a objem prostoru do 60 m^3 , tedy přibližně pro běžný obývací pokoj [5].

Implementovaný adaptivní systém Audyssey, představuje špičkovou aplikaci v oblasti tzv. audioprocessingu. Sebelepší DSP (Digital Signal Processing) ale nedokáže eliminovat nedostatky v prostorové akustice na ploše velkého auditoria. Navíc musíme rozlišovat, zda se pohybujeme v oblasti blízkého, volného nebo difúzního pole. Audyssey MultEQ je určen pro optimalizaci poslechu v rozsahu poslechové plochy 4-8 míst a vytváření doplňkových efektů v domácích podmínkách. Typická instalace s vyznačením měřicích bodů je na obr.138 [6].

Jedná se v podstatě o standardní řešení, jak ho uvádí např. Chromý [7] a jiní.



Obr.138 Příklad kontrolních bodů systému Audyssey MultEQ [6]

U reproduktorových soustav určených pro domácí použití nejsou obvykle uváděny kmitočtové a směrové charakteristiky (a to ani u řady renomovaných značek) a jejich vysokotónové systémy jsou dimenzovány pouze na zlomek udávaného jmenovitého výkonu, jak jsme uvedli například v [3].

SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY

Pro profesionální návrh ozvučovací soustavy jsou směrové charakteristiky zářičů důležitým parametrem při hodnocení pokrytí plochy auditoria vyzařovaným signálem. Číselně udávaný činitel směrovosti Q zpravidla nemá velkou vypovídací hodnotu. Činitel směrovosti je definován poměrem čtverců akustického tlaku reálného (p_r) a všesměrového zářiče (p_0), v akustické ose reálného zářiče v dané vzdálenosti r [8].

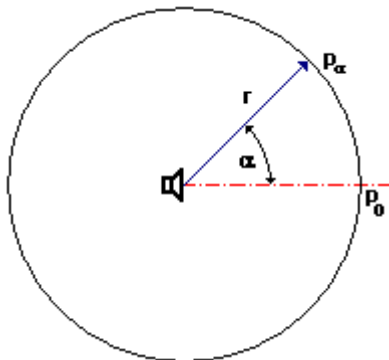
$$Q = \frac{p_r^2}{p_0^2} \quad (49)$$

Podle konstrukce zářiče je činitel směrovosti frekvenčně závislý $Q = f(f)$.

Směrové charakteristiky zářiče můžeme popsat také pomocí směrových funkcí. Směrová funkce S_1 jednoduchého (osově symetrického) zářiče je definována jako podíl akustického tlaku p_a mimo akustickou osu zářiče ve vzdálenosti r k akustickému tlaku p_0 v téže vzdálenosti v ose

zářiče. Opět platí, že směrová funkce je v praxi frekvenčně závislá, $p_\alpha(f)$ a z toho $S_1(f)$ [8].

$$S_1 = \frac{p_\alpha}{p_0} \quad (50)$$

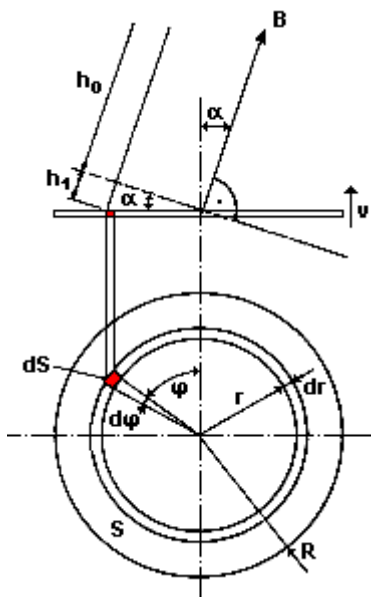


Obr.139 K pojmu směrové funkce

Většina reproduktorových sloupů v současné době používá zářiče malých průměrů s mělkou kuželovou membránou. Aktivní průměr membrány d_a zpravidla nepřesahuje 15 cm. S jistým zjednodušením tak můžeme membránu zářiče považovat za pístově kmitající kruhovou desku o ploše $S = \pi d_a^2/4$, kde d_a je tzv. aktivní průměr membrány a jejíž mechanická rychlost v , definovaná rovnicí

$$v = v_{\max} \cdot e^{j\omega t} \quad (51)$$

je v celé ploše konstantní.



Obr.140 K odvození směrové funkce [8]

Pro teoretické odvození směrové funkce uvažujme bod B ve vzdálenosti h_0 ve směru α od

středu kmitající desky, přičemž platí $h_0 \gg R$, kde $R = d_a/2$, a h_1 je vzdálenost elementární plošky dS od roviny kolmé na směr k bodu B a procházející středem kmitající desky (obr.140). Pro rychlostní potenciál Φ_α v bodu B podle [8] platí

$$\Phi_\alpha = -\frac{v}{2\pi} \iint_S \frac{e^{-jkh}}{h} ds \quad (52)$$

kde k je vlnové číslo a $h = h_0 + h_1$.

Rychlostní potenciál Φ je hypotetická skalární veličina, definovaná tak, že její gradient je roven akustické rychlosti v_{ak} , tj.: $\text{grad}\Phi = v_{ak}$. Vlnové číslo k (vlnový vektor) je definováno $k = 2\pi/\lambda$, kde λ je vlnová délka. Po úpravě, kdy zavedeme $\lambda = c/f$ a $f = \omega/2\pi$, rovněž platí, že $k = \omega/c$, kde ω je kruhová frekvence vyzářovaného signálu a c rychlost šíření vln v daném prostředí. (pozn.aut.)

Potom

$$\Phi_\alpha = -\frac{v \cdot e^{-jkh_0}}{2\pi h_0} \iint_S \frac{e^{-jkh_1}}{1 + \frac{h_1}{h_0}} ds \quad (53)$$

Podle obr.140 můžeme odvodit, že pro h_1 platí

$$h_1 = r \cdot \sin \psi \cdot \sin \alpha \quad (54)$$

$$dS = r \cdot d\psi \cdot dr \quad (55)$$

Za předpokladu, že $h_1/h_0 \rightarrow 0$, můžeme po dosazení (54) a (55) do (53) psát

$$\Phi_\alpha = -\frac{v \cdot e^{-jkh_0}}{2\pi h_0} \int_0^R \int_0^{2\pi} e^{-jkr \cdot \sin \psi \cdot \sin \alpha} \cdot r dr d\psi \quad (56)$$

Rovnice (56) se řeší za pomoci Besselových funkcí nultého a prvního řádu. Podrobný postup řešení je uveden například v [8] a [9]. Pro rychlostní potenciál potom dostaneme výslednou rovnici

$$\Phi_\alpha = -\frac{Rv \cdot e^{-jkh_0}}{h_0 k \sin \alpha} \cdot J_1(kR \sin \alpha) \quad (57)$$

kde J_1 je Besselova funkce prvního řádu. Zavedeme do výpočtu plochu $S = \pi d_a^2/4$

$$\Phi_\alpha = -\frac{2vS \cdot e^{-jkh_0}}{\pi h_0 d_a k \sin \alpha} \cdot J_1\left(k \frac{d_a}{2} \sin \alpha\right) \quad (58)$$

Rychlostní potenciál Φ_0 v ose kmitající desky (pro $\alpha = 0$), ve vzdálenosti h_0 můžeme stanovit přímo z rovnice (53), kde $h_1 = 0$.

$$\Phi_0 = -\frac{v \cdot e^{-jkh_0}}{2\pi h_0} \cdot S \quad (59)$$

Akustický tlak p_α , který odpovídá rychlostnímu potenciálu Φ_α je

$$p_\alpha = -\rho \frac{\partial \Phi_\alpha}{\partial t} \quad (60)$$

kde ρ je hustota prostředí, a pro harmonický signál platí

$$p_\alpha = -j\omega\rho\Phi_\alpha \quad (61)$$

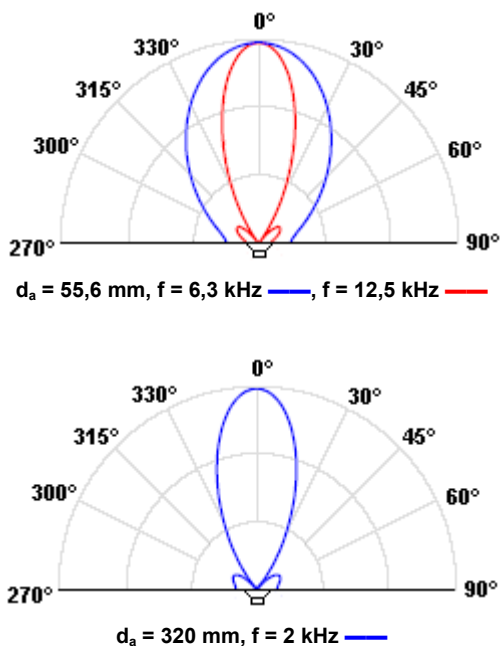
Po dosazení z (61) do (50) pro Φ_α a Φ_0

$$S_1 = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_0} \quad (62)$$

a po dosazení z (58), (59) a zavedení $k = 2\pi/\lambda$

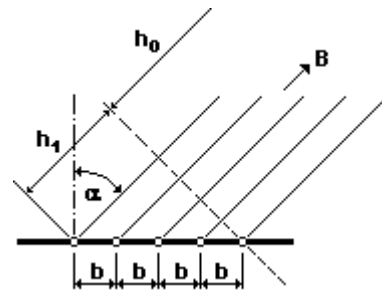
$$S_1 = \frac{2\lambda}{\pi d_a \sin \alpha} \cdot J_1\left(\frac{\pi d_a \sin \alpha}{\lambda}\right) \quad (63)$$

Na obr.141 jsou příklady směrových funkcí při $d_a = 55 \text{ mm}$ a 320 mm pro různé frekvence.



Obr.141 Příklady směrových funkcí reproduktor je uvažován jako kruhová deska

Analogickým postupem lze odvodit směrové funkce pro řadu bodových zdrojů, vyzářujících kulovou vlnu i pro řadu pístově kmitajících desek kruhového průřezu. U řady bodových zdrojů (obr.142) předpokládáme (podle [8]), že leží na přímce a vzdálenosti b mezi nimi jsou stejné (tzv. báze je konstantní).



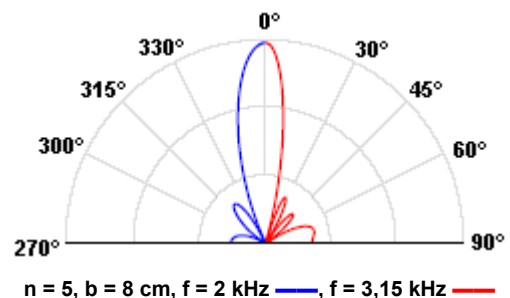
Obr.142 Řada bodových zdrojů

Směrová funkce pro řadu n bodových zdrojů s konstantní bází b , za předpokladu že $h_0 \gg b$, je určena rovnicí

$$S_n = \frac{\sin\left(\frac{\pi n b}{\lambda} \cdot \sin \alpha\right)}{n \sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \cdot \sin \alpha\right)} \quad (64)$$

Podrobné odvození rovnice (64) nalezne zájemce v [8] a [9]. (pozn.aut.)

Na obrázku 143 je příklad směrové funkce pro řadu pěti bodových zdrojů s bází 8 cm při frekvencích 2 kHz a $3,15 \text{ kHz}$. Z průběhů jsou zřetelně viditelné tzv. postranní vyzářovací laloky a rovněž tzv. nulové směry, kam teoreticky není vyzářován žádný signál.

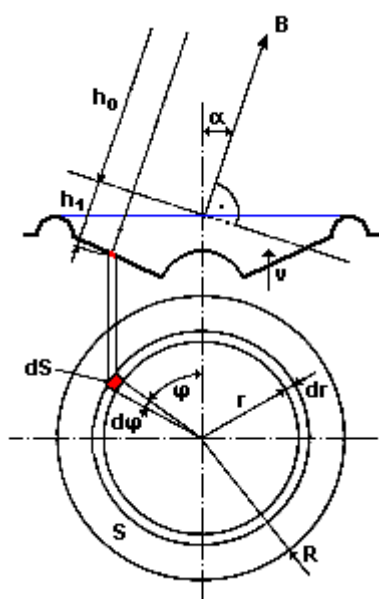


Obr.143 Směrové funkce řady bodových zdrojů

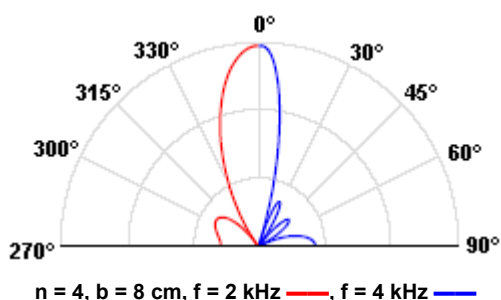
Reproduktorový sloup, jehož směrové charakteristiky nás zajímají, se nejvíce přibližuje řadě n kruhových, pístově kmitajících desek, jejichž středy jsou na jedné přímce ve vzdálenosti b . V praktických aplikacích se obvykle jednotlivé zářiče (reproduktory) montují těsně vedle sebe. Báze sloupu potom bývá nepatrně větší, než geometrické rozměry zářičů. Matematicky lze dokázat, že směrová funkce S_C řady n kruhových, pístově kmitajících desek (podrobně například v [8] a [9]) je součinem směrové funkce S_1 samostatného zářiče a směrové funkce S_n řady bodových zdrojů.

$$S_C = S_1 \cdot S_n \quad (65)$$

Rovnice (65) platí i pro směrové funkce S_1 zjištěné měřením. To je výhodné v případech, kdy je velice obtížné určit směrovou funkci zářiče analyticky matematickým popisem. U složitých zářičů se proto dnes používá výpočet metodou konečných prvků. Výpočet je relativně obtížný i u velkých reproduktorů s hlubokou membránou nerozvinutelného tvaru a reproduktorů se sektorovou membránou, kde se v závislosti na frekvenci mění mechanická rychlost v jednotlivých profilech membrány a tím se mění i její aktivní průměr (obr.144).



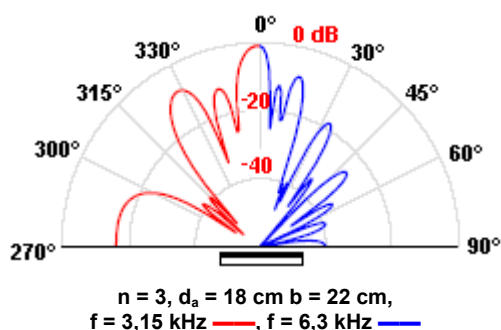
Obr.144 Veličiny z obr.140 na membráně reálného reproduktoru rychlost v nemusí být v závislosti na r konstantní



Obr.145 Směrové funkce řady kruhových desek

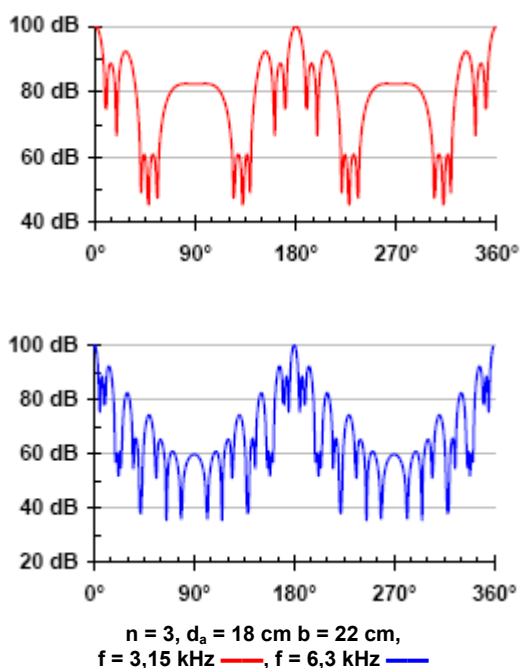
Směrové funkce mají nesporný význam v teorii zářičů a jejich konstruování. Jsou také východiskem pro směrové charakteristiky v hladinovém vyjádření, které se v praxi používají nejčastěji. Nejnázornější je zobrazení směrových charakteristik v polárním grafu (obr.146). Jeho

výhodou je, že i laik získá určitou konkrétní představu, v jakém směru a s jakou "hlasitostí" sloup hraje. Snadno také určíme tzv. vyzařovací úhly, tj. směry, kde hladina akustického tlaku klesne o 10 dB oproti vyzařování v ose.



Obr.146 Směrové charakteristiky reproduktorového sloupu

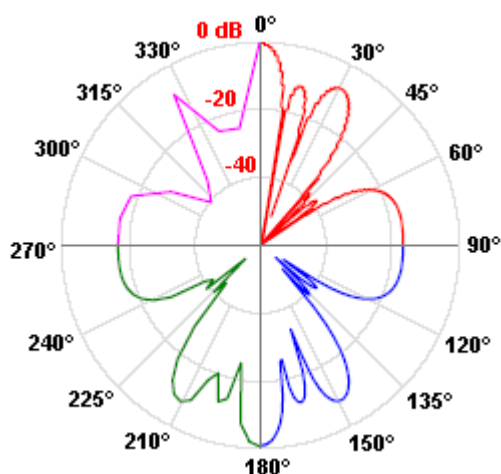
Často se v praxi také setkáváme s vyjádřením směrových charakteristik v kartézské (pravoúhlé) soustavě. Přestože grafy na obr.147 mají stejný informační obsah (významově jsou identické) jako grafy na obr.146, jejich názornost je výrazně menší a pro laiky mají na první pohled téměř nulovou vypovídací hodnotu. V obou případech použítá logaritmická míra lépe koresponduje se sluchovým vnímáním, než směrové funkce s ostrými maximy a zdánlivě užším vyzařovacím diagramem.



Obr.147 Směrové charakteristiky reproduktorového sloupu z obr.146 zobrazení v kartézské soustavě

Přesnost výpočtů z diskrétních hodnot

Při konstrukci grafů směrových funkcí a vyzářovacích charakteristik z diskrétních hodnot, je nutné optimalizovat počet kroků výpočtu tak, aby grafy byly přehledné a co nejvíce odpovídaly skutečnosti. Na obr.148 je uveden příklad výpočtu směrové charakteristiky reproduktorového sloupu se třemi zářiči s aktivním průměrem membrány $d_a = 18$ cm a bází $b = 22$ cm za pomoci tabulkového procesoru MS-Excel. Pro výpočet byl použit krok $0,1^\circ, 1^\circ, 3^\circ$ a 10° při frekvenci 3,15 kHz. Pro větší názornost jsou grafy v kvadrantech polárních souřadnic.



Obr.148 Porovnání přesnosti výpočtu směrových charakteristik

reproduktorový sloup
 $n = 3$, $d_a = 18$ cm $b = 22$ cm, $f = 3,15$ kHz
krok výpočtu: $0,1^\circ$ —, 1° —, 3° —, 10° —

Po analýze výsledků (viditelných i v grafu) je zřejmé, že při výpočtech s krokem $\alpha \leq 0,1^\circ$ (min 3 600 bodů) dostaneme zřetelně ohraničené vyzářovací laloky s vyznačenými nulovými směry. Výpočet s krokem 1° (360 bodů) má srovnatelnou přesnost, jen nulové směry nemají tak ostré vyznačení. Krok po 3° (120 bodů) je vhodný k pouze prvnímu přiblížení, a to ještě pouze pro relativně nízké frekvence, kdy soustava zářičů nemá mnoho postranních laloků. Výpočty s krokem nad 5° už nemají téměř praktický význam, uvedený příklad výpočtu při kroku 10° (36 bodů) je v praxi prakticky nepoužitelný. Výjimkou jsou výpočty pro frekvence, kdy se zářič chová téměř jako všesměrový s minimálními změnami vyzářovací charakteristiky.

REPRODUKTOROVÝ SLOUP DPT208

Jak jsme uvedli v [2], DPT208 je malý reproduktorový sloup osazený osmi širokopásmovými reproduktory o průměru 2,5", určený pro vnitřní instalace. Plášť sloupu tvoří tažený hliníkový profil, nastříkaný bílým Komaxitem, do vodících drážek je spolu s krycím děrovaným plechem nasunuta sestava reproduktorů opatřená pružným molitanem. Vnitřní tlumení sloupu je provedeno pruhem netkané textilie (vatelínu). Z obou stran je sloup uzavřen plastovými čely, ve kterých jsou upevňovací matice pro konzoly (obr.149).

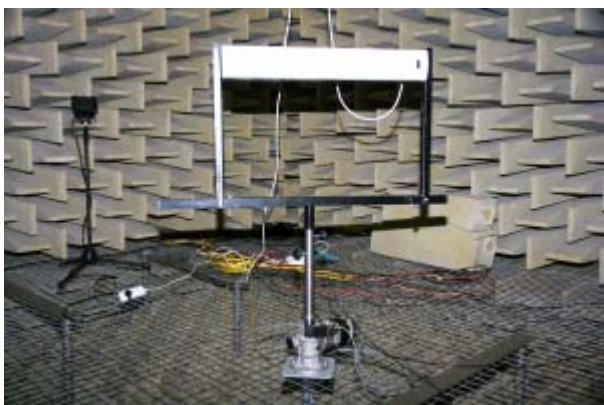


Obr.149 Reproduktorový sloup DPT208 [2]

Katedra technických předmětů Pedagogické fakulty Univerzity Hradec Králové pořídila pro potřeby výuky v předmětu Auditoriologie učeben pro učitele osm reproduktorových sloupů DPT208 z rozvojového projektu FRVŠ 594/2007 pro mobilní výukové pracoviště. Subjektivní hodnocení reprodukce a směrových účinků, po demontáži problematických převodních transformátorů (podrobně v [2]), bylo pozitivní.

V rámci projektu specifického výzkumu PdF 19/2011 jsme ve spolupráci s Ing. Oldřichem Turečkem, Ph.D., vedoucím akustických laboratoří FEL ZČU v Plzni, provedli měření frekvenčních a směrových charakteristik reproduktorového sloupu DPT208. Měření byla provedena v bezdrazové komoře akustických laboratoří FEL ZČU, za použití analyzátoru Brüel & Kjaer 2260 (obr.150 a 151).

Výchozí hodnoty pro měření a kontrolní výpočty jsou uvedeny v tabulce 14.



Obr.150 Reprodukční sloup DPT208 instalovaný na točně bezodrazové komory



Obr.151 Řídicí pracoviště bezodrazové komory

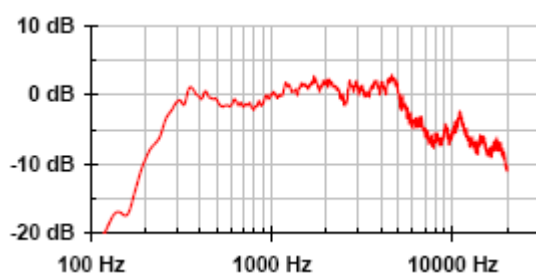
Tab.14 Výchozí hodnoty

parametr	zn.	hodnota
počet reproduktorů	n	8
jmenovitý průměr	d	2,5"
aktivní průměr membrány	d_a	55 mm
báze sloupu	b	72,5 mm
aktivní vyzařovací plocha	S_a	190 cm ²
měřicí vzdálenost	L_m	2,26 m
příkon sloupu při měření	P	1 VA
napájecí napětí	U_{RMS}	4 V
teplota v komoře	T	21,3 °C
relativní vlhkost vzduchu	φ	54 %

Frekvenční charakteristika

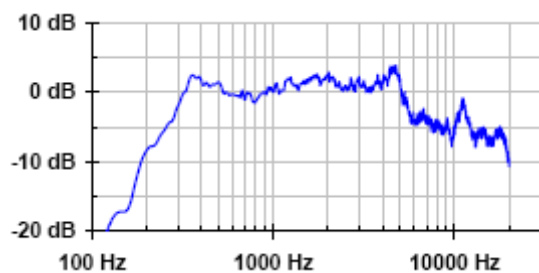
Frekvenční charakteristika byla měřena bílým šumem pomocí FFT (Fast Fourier Transformation). Měřeno 3 200 spektrálních čar v pásmu 6,25 Hz až 20 kHz, $\Delta f = 6,25 \text{ Hz [T]}$. Způsob upevnění reproduktorů (obr.149), čelní krycí mřížka a její děrování spolu vytvářejí relativně velkou dutinu uvnitř sloupu. Proto byla změřena i frekvenční charakteristika bez krycí mříž-

ky. Výsledky jsou uvedeny v grafech na obrázcích 152-154. Reprodukční sloup DPT208 mají v pásmu 250 Hz až 5,8 kHz vyrovnanou frekvenční charakteristiku, zvlnění nepřesahuje $\pm 3 \text{ dB}$ (referenční frekvence pro všechny charakteristiky $f_0 = 1 \text{ kHz}$). Při poklesu hladiny akustického tlaku o -6dB dosahuje frekvenční rozsah DPT208 k 15 kHz. Pokles v oblasti nad 5 kHz lze vyrovnat korekcemi přenosové charakteristiky v rámci tzv. sálových korekcí, tyto jsou obvykle nutné pro vyrovnání úrovně sýkavek v důsledku útlumu vysokých frekvencí při šíření vzduchem a pro zachování potřebné srozumitelnosti řeči.

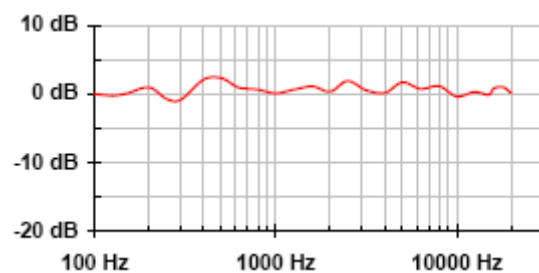


Obr.152 Frekvenční charakteristika DPT208

Drobné změny vykazuje frekvenční charakteristika sloupu bez krycí mřížky (obr.153), ty jsou však vzhledem k předpokládaným aplikacím zanedbatelné. Odchytky charakteristiky od průběhu zobrazeného na obr.152 nepřesahují 2 dB (obr.154).



Obr.153 Frekvenční charakteristika DPT208 bez krycí mřížky



Obr.154 Rozdíly frekvenčních charakteristik průběh je aproximován pro třetinoctávová pásma

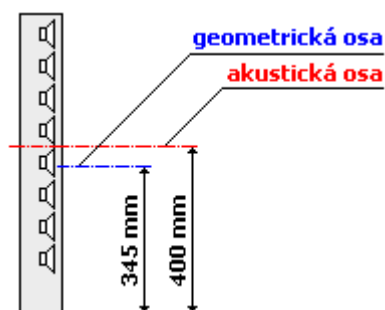
Charakteristická citlivost

Charakteristická citlivost byla měřena v souladu s ČSN IEC 268-5 a ČSN EN 60268-5 různým šumem filtrovaným pro pásmo 150 Hz až 20 kHz, měření v třetinooktávových pásmech, při buzení 1 VA (budicí napětí $U_{RMS} = 4$ V) ve vzdálenosti 2,26 m (přibližně trojnásobek délky sloupu).

Charakteristická citlivost určená analyzátozem v měřicí vzdálenosti 2,26 m je 87,3 dB při příkonu 1 VA. Ekvivalentní charakteristická citlivost ve vzdálenosti 1 m, přepočítaná z průběhu akustického tlaku v akustické ose sloupu v pásmu 400 Hz až 4 kHz je 95,8 dB/1 VA/1 m.

Směrové charakteristiky

Směrové (vyzařovací) charakteristiky reproduktorového sloupu byly měřeny v horizontální a vertikální rovině, nulovým směrem je vždy akustická osa sloupu. Vzhledem k uspořádání zářičů a mechanické konstrukci není akustická osa totožná s osou geometrickou (obr.155). To je také důvod, proč je reproduktorový sloup na točně (obr.150) umístěn zdánlivě asymetricky.



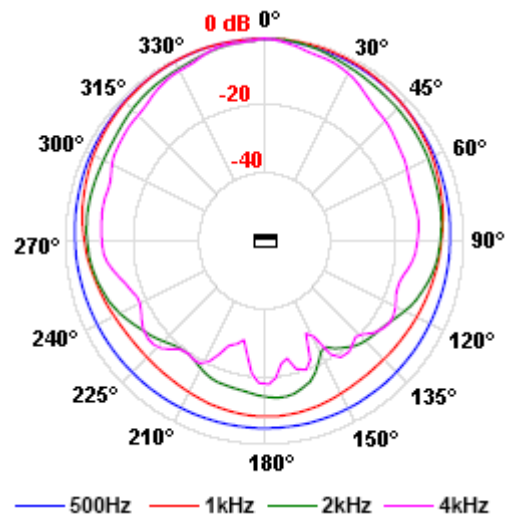
Obr.155 Geometrická a akustická osa DPT208

Pro běžnou instalaci nemá 55mm rozdíl mezi akustickou a geometrickou osou až tak zásadní význam, pro skládané zářiče je však už důležité montovat sloupy "hlavou na sebe", tak aby zůstala zachována báze b po celé délce sloupu.

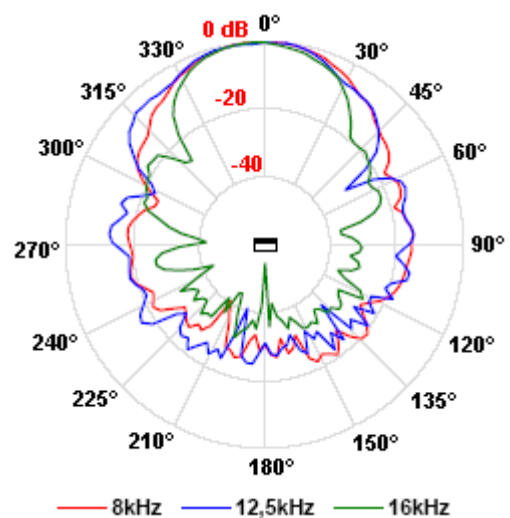
Směrové charakteristiky v horizontální rovině byly měřeny v oktávové řadě 0,5; 1; 2; 4; 8 a 16 kHz. Doplnující měření bylo provedeno pro frekvenci 12,5 kHz (obr.155 a 156).

Měření v oktávové řadě je dostačující, vyzařovací diagramy v předním poloprostoru korespondují s charakteristikami vypočítanými pro

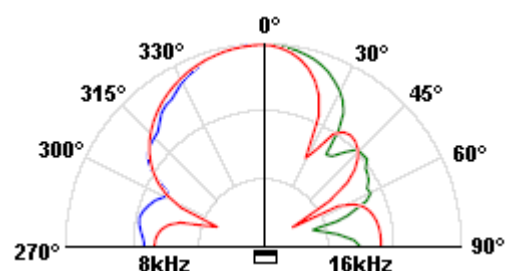
ideální zářič tvaru kruhové pístově kmitající desky. Srovnání charakteristik pro frekvence 8 kHz a 16 kHz je na obrázku 157. Všechny charakteristiky jsou normovány na úroveň 0 dB v akustické ose reproduktorového sloupu.



Obr.155 Směrové charakteristiky DPT208 horizontální rovina v akustické ose



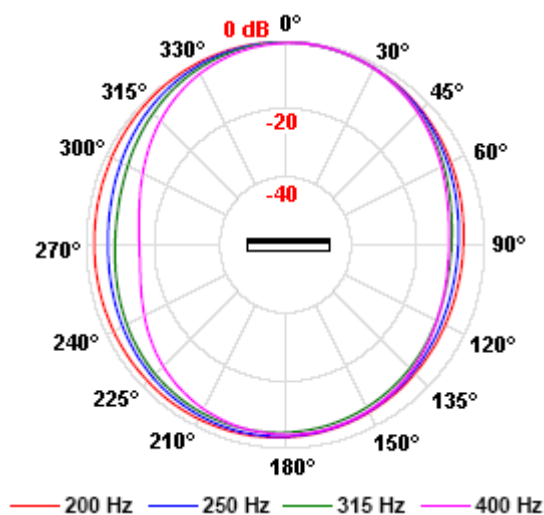
Obr.156 Směrové charakteristiky DPT208 horizontální rovina v akustické ose



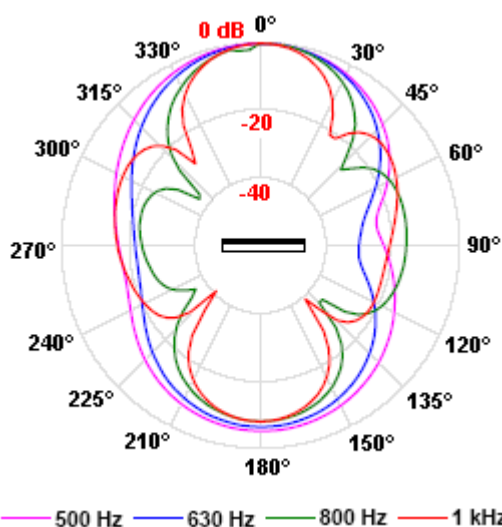
Obr.157 Porovnání horizontálních směrových charakteristik DPT208 a ideálního zářiče vypočítaný teoretický průběh DPT208: f = 8 kHz, f = 16 kHz

Ze změřených a srovnávacích charakteristik lze odvodit, že směrové charakteristiky v horizontální rovině jsou dány směrovými charakteristikami použitých zářičů. Difrakce na čelní krycí mřížce potom způsobují rozšíření vyzařovacího diagramu u vysokých frekvencích. Výraznější směrování sloupu se projevuje až pro pásmo frekvencí nad 4 kHz. Pro frekvence do 8 kHz můžeme uvažovat s horizontálním vyzařovacím úhlem $\gamma_h = 90^\circ$. Při $f = 16$ kHz je $\gamma_h = 60^\circ$.

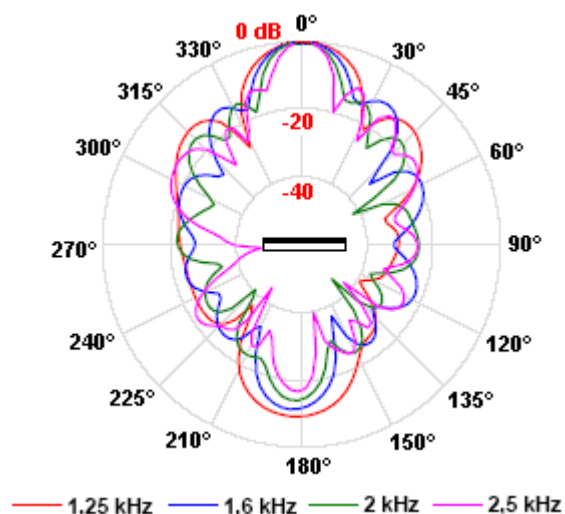
Směrové charakteristiky ve vertikální rovině byly měřeny v třetinooktávové řadě frekvencí od 160 Hz do 20 kHz. Zobrazeny jsou charakteristiky v rozsahu od 200 Hz do 16 kHz, a to v řadě 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800 Hz a 1; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5 a 16 kHz.



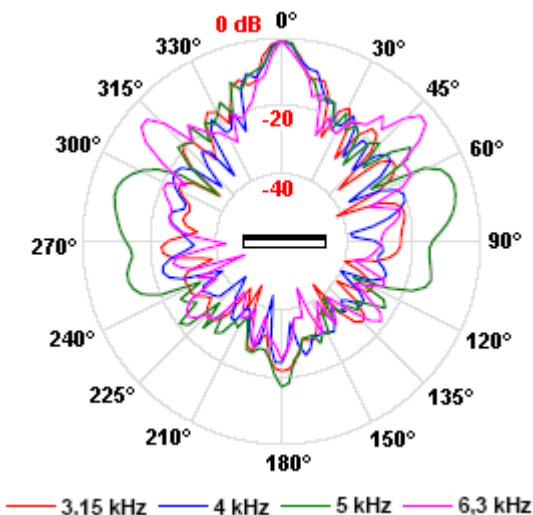
Obr.158 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose



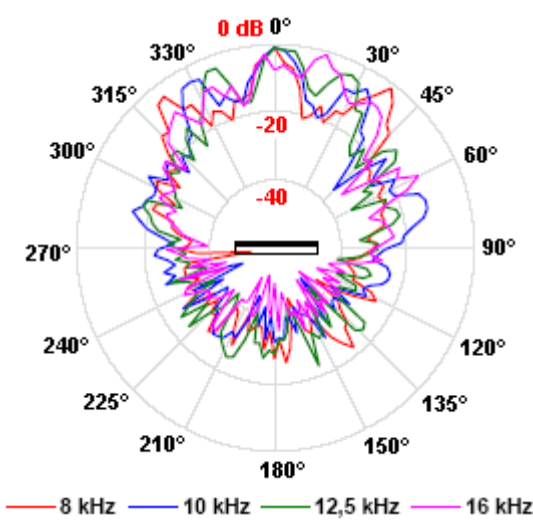
Obr.159 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose



Obr.160 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose



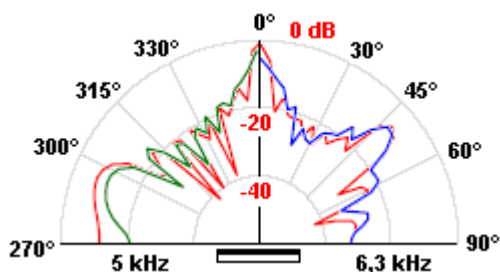
Obr.161 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose



Obr.162 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose

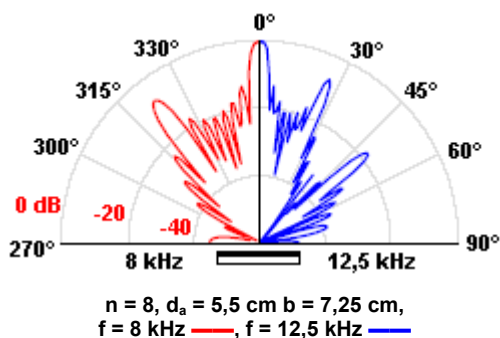
Všechny směrové charakteristiky ve vertikální rovině byly změřeny v souladu s normou ČSN EN 60268-5 signálem sinusového průběhu a stejně jako charakteristiky v rovině vertikální jsou normovány na úroveň 0 dB v akustické ose reproduktorového sloupu.

Změřené vyzařovací charakteristiky ukazují, že směřování akustického signálu nastává již pro frekvence nad 500 Hz. Pro frekvence 800 Hz a vyšší vykazuje DPT208 již výrazné svazkování energie. V oblasti středních a vyšších středních frekvencí (od 1 kHz do 6,3 kHz), tedy v oblasti kde se nacházejí hlasové formanty, lze uvažovat s vyzařovacím úhlem ve vertikální rovině $\gamma_v = 25-30^\circ$. Výrazné boční laloky, v tomto případě v podélné ose sloupu, resp. v úhlu $\pm 45^\circ$, nacházíme při frekvencích 5 kHz a 6,3 kHz.



Obr.163 Porovnání vertikálních směrových charakteristik DPT208 a ideálního zářiče
vypočítaný teoretický průběh —
DPT208: $f = 5 \text{ kHz}$ —, $f = 6,3 \text{ kHz}$ —

Porovnáme-li vyzařovací diagramy změřené ve vertikální rovině v předním poloprostoru sloupu s teoretickými charakteristikami vypočítanými pro ideální zářič řady pístově kmitajících kruhových desek, je zřejmé, že pro frekvence 5 kHz a 6,3 kHz spolu reálné a teoretické charakteristiky korespondují (obr.163). Na změřených charakteristikách jsou méně výrazná minima v tzv. nulových směrech.



Obr.164 Směrové charakteristiky řady pístově kmitajících kruhových desek

V pásmu vysokých frekvencí, se uplatňují difrakce na čelní mřížce. Pro frekvence od 8 kHz do 16 kHz je tak směrová charakteristika více vyrovnaná, bez výrazných vedlejších laloků.

Na obr.164 jsou pro srovnání vypočítané průběhy řady pístově kmitajících kruhových desek pro frekvence 8 kHz a 12,5 kHz.

MOŽNOSTI APLIKACE VÝSLEDKŮ DO PROCESU VZDĚLÁVÁNÍ

Soubor naměřených hodnot, spolu s výpočty prediktivních charakteristik a jejich variacemi představuje rozsáhlý materiál, který lze použít nejen pro popis technických parametrů reproduktorového sloupu DPT208 a pro optimalizaci jeho aplikací v nejrůznějších akustických prostorech, ale tato data můžeme využít jako konkrétní příklady při výuce. Uvedené frekvence a směrové charakteristiky budou zejména využívány pro výuku v předmětu Auditoriologie učeben pro učitele. Cílem předmětu je seznámit studenty nejen s auditoriologií jako vědním oborem, ale ukázat nutnost jejího těsného propojení s oborovými didaktikami, včetně možné aplikace komunikačních modelů při řešení přenosových kanálů učeben [11].



Obr.165 Analyzátor NTi XL2

Studenti se na konkrétních příkladech reálných směrových charakteristik seznámí s jejich významem a s postupem návrhu řešení ozvučení při využití naměřených hodnot a simulovaných průběhů. Zároveň si mohou chování reproduktorových sloupů ověřit přímo v praxi. V rámci řešení projektu specifického výzkumu získala katedra technických předmětů moderní analy-

zátor NTi XL2 (obr.165). Studenti tak mohou během krátkého času provést několikanásobná akustická měření. Zpracování výsledků potom provedou v rámci seminárních prací nebo projektových úkolů.

Možnost prakticky přímého srovnání různých řešení ozvučovacího systému (které umožňuje náš mobilní komplex a jeho variabilita), včetně okamžitého záznamu naměřených hodnot, je nenahraditelnou osobní zkušeností. Výuka se tím posouvá na zcela jinou kvalitativní úroveň, přičemž za mimořádně významný považujeme právě posun k praktickým aplikacím. Součástí praktických aplikací je i softwarová podpora pro hodnocení prostorových parametrů učeben a jejich akustiky.

ZÁVĚR

Na základě podrobné analýzy výsledků měření, porovnání naměřených hodnot s teoretickými předpoklady a z výsledků provozních zkoušek můžeme konstatovat, že reproduktorový sloup DPT208 představuje akustický zářič s dobrými přenosovými vlastnostmi a směrovými charakteristikami, který je plně srovnatelný s jinými (a mnohdy výrazně dražšími) pasivními reproduktorovými sloupy osazenými širokopásmovými reproduktory. Také srovnání cena/výkon

řadí DPT208 mezi nejlepší produkty ve své kategorii. Připomínáme ovšem, že námi publikované výsledky se vztahují na DPT208 bez převodního transformátoru [2]. Pochopitelně není možné je srovnávat s digitálně řízenými reproduktorovými sloupy Iconyx nebo EAW, které jsou ale více jak stonásobně dražší.

DPT208 představuje velmi dobrý základ pro návrh ozvučovacího systému pro přenos řeči (a případně hudební kulisy). Je také mimořádně vhodnou alternativou standardně dodávaného ozvučení interaktivních tabulí, kde díky směrovému vyzařování zvyšuje dosažitelnou srozumitelnost a omezuje energii difúzního pole. Při samostatné instalaci je vhodný pro dosah kolem 12 m.

V dalším pokračování se zaměříme na problematiku skládaných akustických zářičů, realizovaných z reproduktorových sloupů DPT 208, a to v několika verzích.

Článek byl vytvořen s podporou projektu specifického výzkumu SV PdF 19/2011 Predikce směrových charakteristik skládaných akustických zářičů a možnosti jejich využití pro ozvučovací systémy učeben.

Autoři děkují Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za odbornou a technickou pomoc při měření v akustických laboratořích FEL ZČU.

Použité zdroje

- [1] DRTINA, R. - MANĚNA, V. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 6. - Reproduktorové sloupy*. Media4u Magazine. 1/2008. s.9-19. ISSN 1214-9187.
- [2] DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 7. - Linkové transformátory*. Media4u Magazine. 3/2009. s.38-49. ISSN 1214-9187.
- [3] DRTINA, R. - MANĚNA, V. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 5. - Vybíráme reproduktorové soustavy*. Media4u Magazine. 4/2007. s.8-17. ISSN 1214-9187.
- [4] ONKYO. *AV Receiver TX-NR808. Instruction Manual*. Onkyo Corporation Japan. SN 29400329.
- [5] THX Lucas Films. *New THX Certification Category: Small is Big*. [cit.2012-01-12] Dostupné z WWW: <<http://www.thx.com/>>
- [6] AUDYSSEY. *MultEQ*. [cit.2012-01-12] Dostupné z WWW: <<http://www.audyssey.com/>>
- [7] CHROMÝ, J. *Materiální didaktické prostředky v informační společnosti*. Praha. Verbum. 2011. ISBN 978-80-904415-5-2.
- [8] MERHAUT, J. *Teoretické základy elektroakustiky*. Praha. Academia. 1985.
- [9] ŠKVOR, Z. *Akustika a elektroakustika*. Praha. Academia. 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [10] TUREČEK, O.
- [11] CHROMÝ, J. - DRTINA, R. *Vybrané souvislosti výuky a přenosového modelu komunikace*. Media4u Magazine. 4/2010. s.89-92. ISSN 1214-9187.

Kontaktní adresy

PaedDr. René Dřtina, Ph.D. e-mail: rene.drtdina@uhk.cz
doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc. e-mail: jaroslav.lokvenc@uhk.cz
Tomáš Provazník
Michal Švandrlík

Katedra technických předmětů PdF UHK
Rokitanského 62
500 03 Hradec Králové

René Drtina - Jaroslav Lokvenc - Tomáš Provazník - Michal Švandrlík

*Katedra technických předmětů, Pedagogická fakulta, Univerzita Hradec Králové
Department of Technical subjects, Faculty of Education, University of Hradec Králové*

Abstrakt: Článek se zabývá principiálním řešením ozvučovacích soustav velkých auditorií (učebny a přednáškové sály). Uvádí výhody, nevýhody a podmínky funkce jednotlivých typů ozvučovacích soustav, způsob řešení i specifické požadavky pro velké ozvučovací systémy. Osmá část je věnována problematice směrových charakteristik reproduktorových sloupů.

Abstract: *This article deals with the fundamental solution of the sound systems for lecture and assembly halls. It presents advantages, disadvantages and conditions of functioning the single types of sound systems, ways of solving problems and specific requirements for large sound systems. Part eight deals with problems of directional characteristics of the column speaker.*

Klíčová slova: Směrová charakteristika, reproduktorový sloup, ozvučovací soustava.

Keywords: *Directional characteristics, column speaker, sound system.*

ÚVOD K OSMÉ ČÁSTI

Seznámení se směrovými akustickými zářiči typu reproduktorového sloupu bylo uvedeno v [1]. K tomuto tématu jsme se vrátili o rok později v souvislosti s hledáním příčin nepřiliš uspokojivého zvuku malých reproduktorových sloupů, dodávaných pod různým označením řadou obchodních a montážních firem [2].

V roce 2011 jsme s finanční podporou projektu specifického výzkumu *Predikce směrových charakteristik skládaných akustických zářičů a možnosti jejich využití pro ozvučovací systémy učeben* mohli detailně popsat vlastnosti námi upravených reproduktorových sloupů DPT 208. Cílem výzkumu bylo ověřit soulad teoretických předpokladů s reálnými vyzářovacími charakteristikami reproduktorových sloupů a z nich skládaných zářičů. Reproduktorové sloupy jsou totiž neprávem opomíjené zářiče, s příznivými akustickými vlastnostmi.

Učebny a posluchárny obvykle patří mezi prostory bez akustických úprav, které jsou převážně tlumeny pouze přítomností žáků. Akustické prostředí je tak poměrně proměnlivé, s nadlimitní dobou dozvuku a energetickou převahou v dolní části spektra. Výsledky rozsáhlého výzkumu v oblasti přenosových vlastností uče-

ben ve většině případů ukázaly nevyhovující parametry, kdy se srozumitelnost řeči pohybuje pod úrovní 90 %.

UČEBNA NENÍ OBÝVACÍ POKOJ

Ozvučování učeben a poslucháren patří ke specifickým úkolům elektroakustiky. Předcházet by mu však měla akustická příprava prostoru. Jedná se zejména o úpravu doby dozvuku a vyrovnání dozvukového spektra, přitom za hlavní hodnotící parametr akustiky učebny lze považovat dokonalou srozumitelnost řeči, nastavení ozvučení na hlasovou podobu a s tím související minimální sluchovou únavu. Výsledky námi provedených měření ukazují, že řada ozvučovacích systémů poslucháren není podložena projektem a měřením. Jsou používány nevhodné, ale i chybně instalované komponenty a ani drahé řešení není nutně zárukou kvality. To vyplývá i z analýzy projektů FRVŠ za posledních pět let, kde některé návrhy (nebo dokonce realizace) představují nejen principiálně špatné řešení, ale i plýtvání finančními prostředky.

Typickým příkladem může být používání systémů domácího kina pro ozvučení velkých poslucháren. I v případě špičkových domácích zařízení se stále jedná o komerční techniku, která

není určena pro jiné použití [3]. Problémem je především výkonové dimenzování zářičů (reproduktorů) v soustavách, které je u profesionálních systémů podstatně vyšší, dimenzování výkonových zesilovačů, ale i další doplňkové funkce těchto zařízení. Zásadní rozdíl je v tom, že úkolem domácích zařízení je ozvučit plochu o velikosti několika metrů čtverečních, pro 4-8 osob. Multiformátový reciver Onkyo TX-NR 808 je příkladem špičkového zařízení pro domácí kino (obr.137). Tak ho také výrobce deklaruje a v manuálu udává pravdivé parametry.



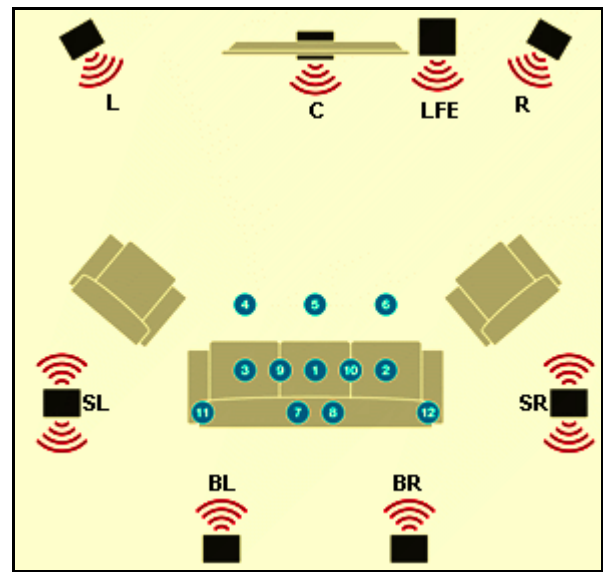
Obr.137 Reciver Onkyo TX-NR 808

Zatímco naši prodejci uvádějí v nabídce výkon $7 \times 180 \text{ W}$, výrobce udává 180 W při vybuzení jen jednoho kanálu [4], celkový výstupní výkon tedy rozhodně není vypočtených $1\,260 \text{ W}$.

Také certifikace THX Select2, kterou reciver má, jej určuje pro pozorovací a poslechovou vzdálenost 3-4 m a objem prostoru do 60 m^3 , tedy přibližně pro běžný obývací pokoj [5].

Implementovaný adaptivní systém Audyssey, představuje špičkovou aplikaci v oblasti tzv. audioprocessingu. Sebelepší DSP (Digital Signal Processing) ale nedokáže eliminovat nedostatky v prostorové akustice na ploše velkého auditoria. Navíc musíme rozlišovat, zda se pohybujeme v oblasti blízkého, volného nebo difúzního pole. Audyssey MultEQ je určen pro optimalizaci poslechu v rozsahu poslechové plochy 4-8 míst a vytváření doplňkových efektů v domácích podmínkách. Typická instalace s vyznačením měřicích bodů je na obr.138 [6].

Jedná se v podstatě o standardní řešení, jak ho uvádí např. Chromý [7], Tureček [8], a jiní.



Obr.138 Příklad kontrolních bodů systému Audyssey MultEQ [6]

U reproduktorových soustav určených pro domácí použití nejsou obvykle uváděny kmitočtové a směrové charakteristiky (a to ani u řady renomovaných značek) a jejich vysokotónové systémy jsou dimenzovány pouze na zlomek udávaného jmenovitého výkonu, jak jsme uvedli například v [3].

SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY

Pro profesionální návrh ozvučovací soustavy jsou směrové charakteristiky zářičů důležitým parametrem při hodnocení pokrytí plochy auditoria vyzařovaným signálem. Číselně udávaný činitel směrovosti Q_v zpravidla nemá velkou vypovídací hodnotu. Činitel směrovosti je definován poměrem čtverců akustického tlaku reálného (p_r) a všesměrového zářiče (p_0), v akustické ose reálného zářiče v dané vzdálenosti r

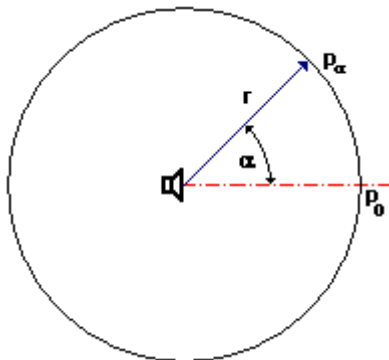
$$Q_v = \frac{p_r^2}{p_0^2} \quad (49)$$

Podle konstrukce zářiče je činitel směrovosti frekvenčně závislý $Q_v = f(f)$ [9].

Směrové charakteristiky zářiče můžeme popsat také pomocí směrových funkcí. Směrová funkce S_1 jednoduchého (osově symetrického) zářiče je definována jako podíl akustického tlaku p_a mimo akustickou osu zářiče ve vzdálenosti r k akustickému tlaku p_0 v téže vzdálenosti v ose

zářiče. Opět platí, že směrová funkce je v praxi frekvenčně závislá, $p_\alpha(f)$ a z toho $S_1(f)$ [9].

$$S_1 = \frac{P_\alpha}{P_0} \quad (50)$$

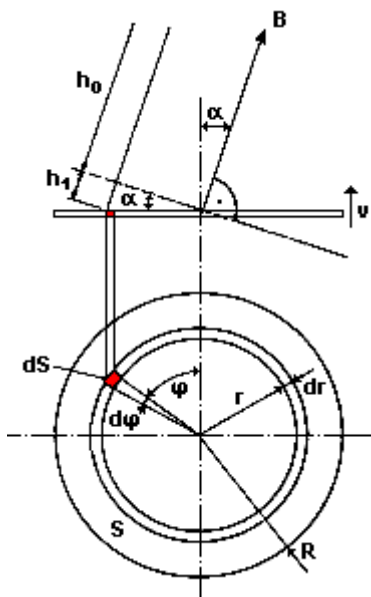


Obr.139 K pojmu směrové funkce

Většina reproduktorových sloupů v současné době používá zářiče malých průměrů s mělkou kuželovou membránou. Aktivní průměr membrány d_a zpravidla nepřesahuje 15 cm. S jistým zjednodušením tak můžeme membránu zářiče považovat za pístově kmitající kruhovou desku o ploše $S = \pi d_a^2/4$, kde d_a je tzv. aktivní průměr membrány a jejíž mechanická rychlost v , definovaná rovnicí

$$v = v_{\max} \cdot e^{j\omega t} \quad (51)$$

je v celé ploše konstantní.



Obr.140 K odvození směrové funkce [8]

Pro teoretické odvození směrové funkce uvažujeme bod B ve vzdálenosti h_0 ve směru α od

středu kmitající desky, přičemž platí $h_0 \gg R$, kde $R = d_a/2$, a h_1 je vzdálenost elementární plošky dS od roviny kolmé na směr k bodu B a procházející středem kmitající desky (obr.140). Pro rychlostní potenciál Φ_α v bodu B podle [9] platí

$$\Phi_\alpha = -\frac{v}{2\pi} \iint_S \frac{e^{-jkh}}{h} ds \quad (52)$$

kde k je vlnové číslo a $h = h_0 + h_1$.

Rychlostní potenciál Φ je hypotetická skalární veličina, definovaná tak, že její gradient je roven akustické rychlosti v_{ak} , tj.: $\text{grad}\Phi = v_{ak}$. Vlnové číslo k (vlnový vektor) je definováno $k = 2\pi/\lambda$, kde λ je vlnová délka. Po úpravě, kdy zavedeme $\lambda = c/f$ a $f = \omega/2\pi$, rovněž platí, že $k = \omega/c$, kde ω je kruhová frekvence vyzářovaného signálu a c rychlost šíření vln v daném prostředí. (pozn.aut.)

Potom

$$\Phi_\alpha = -\frac{v \cdot e^{-jkh_0}}{2\pi h_0} \iint_S \frac{e^{-jkh_1}}{1 + \frac{h_1}{h_0}} ds \quad (53)$$

Podle obr.140 můžeme odvodit, že pro h_1 platí

$$h_1 = r \cdot \sin \psi \cdot \sin \alpha \quad (54)$$

a

$$dS = r \cdot d\psi \cdot dr \quad (55)$$

Ze předpokladu, že $h_1/h_0 \rightarrow 0$, můžeme po dosazení (54) a (55) do (53) psát

$$\Phi_\alpha = -\frac{v \cdot e^{-jkh_0}}{2\pi h_0} \int_0^R \int_0^{2\pi} e^{-jkr \cdot \sin \psi \cdot \sin \alpha} \cdot r dr d\psi \quad (56)$$

Rovnice (56) se řeší za pomoci Besselových funkcí nultého a prvního řádu. Podrobný postup řešení je uveden například v [8] a [9]. Pro rychlostní potenciál potom dostaneme výslednou rovnici

$$\Phi_\alpha = -\frac{Rv \cdot e^{-jkh_0}}{h_0 k \sin \alpha} \cdot J_1(kR \sin \alpha) \quad (57)$$

kde J_1 je Besselova funkce prvního řádu. Zavedeme do výpočtu plochu $S = \pi d_a^2/4$

$$\Phi_\alpha = -\frac{2vS \cdot e^{-jkh_0}}{\pi h_0 d_a k \sin \alpha} \cdot J_1\left(k \frac{d_a}{2} \sin \alpha\right) \quad (58)$$

Rychlostní potenciál Φ_0 v ose kmitající desky (pro $\alpha = 0$), ve vzdálenosti h_0 můžeme stanovit přímo z rovnice (53), kde $h_1 = 0$.

$$\Phi_0 = -\frac{v \cdot e^{-jk h_0}}{2\pi h_0} \cdot S \quad (59)$$

Akustický tlak p_α , který odpovídá rychlostnímu potenciálu Φ_α je

$$p_\alpha = -\rho \frac{\partial \Phi_\alpha}{\partial t} \quad (60)$$

kde ρ je hustota prostředí, a pro harmonický signál platí

$$p_\alpha = -j\omega\rho\Phi_\alpha \quad (61)$$

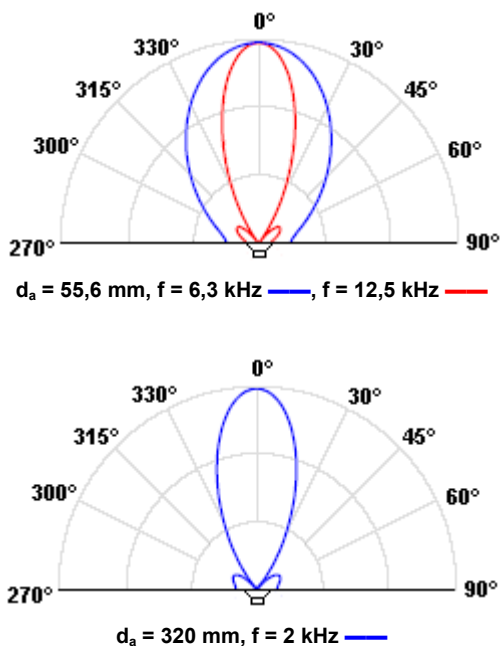
Po dosazení z (61) do (50) pro Φ_α a Φ_0

$$S_1 = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_0} \quad (62)$$

a po dosazení z (58), (59) a zavedení $k = 2\pi/\lambda$

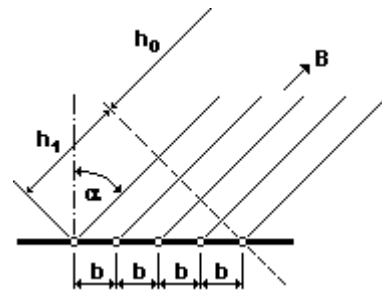
$$S_1 = \frac{2\lambda}{\pi d_a \sin \alpha} \cdot J_1\left(\frac{\pi d_a \sin \alpha}{\lambda}\right) \quad (63)$$

Na obr.141 jsou příklady směrových funkcí při $d_a = 55 \text{ mm}$ a 320 mm pro různé frekvence.



Obr.141 Příklady směrových funkcí reproduktor je uvažován jako kruhová deska

Analogickým postupem lze odvodit směrové funkce pro řadu bodových zdrojů, vyzářujících kulovou vlnu i pro řadu pístově kmitajících desek kruhového průřezu. U řady bodových zdrojů (obr.142) předpokládáme (podle [9]), že leží na přímce a vzdálenosti b mezi nimi jsou stejné (tzv. báze je konstantní).



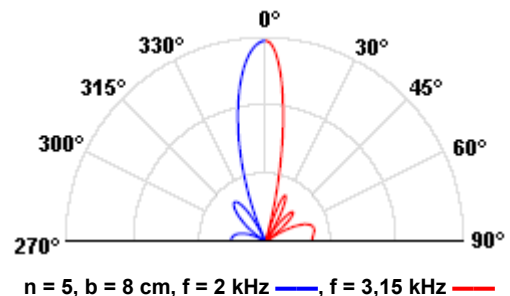
Obr.142 Řada bodových zdrojů

Směrová funkce pro řadu n bodových zdrojů s konstantní bází b , za předpokladu že $h_0 \gg b$, je určena rovnicí

$$S_n = \frac{\sin\left(\frac{\pi n b}{\lambda} \cdot \sin \alpha\right)}{n \sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \cdot \sin \alpha\right)} \quad (64)$$

Podrobné odvození rovnice (64) nalezne zájemce v [9], [10]. (pozn.aut.)

Na obrázku 143 je příklad směrové funkce pro řadu pěti bodových zdrojů s bází 8 cm při frekvencích 2 kHz a $3,15 \text{ kHz}$. Z průběhů jsou zřetelně viditelné tzv. postranní vyzářovací laloky a rovněž tzv. nulové směry, kam teoreticky není vyzářován žádný signál.

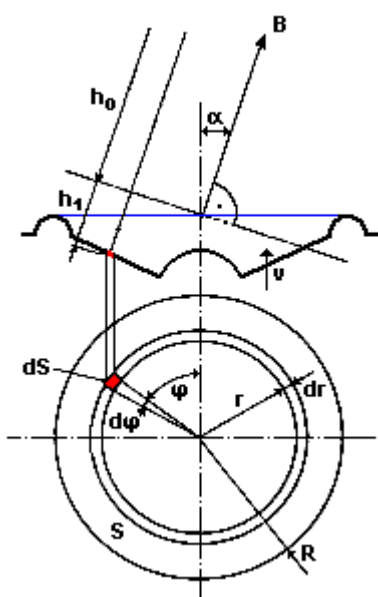


Obr.143 Směrové funkce řady bodových zdrojů

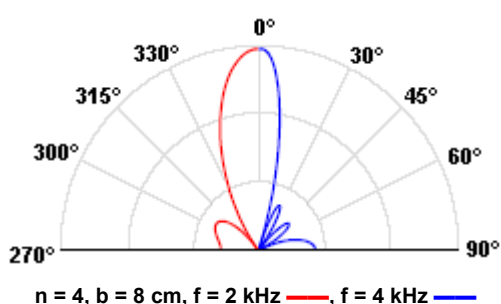
Reproduktorový sloup, jehož směrové charakteristiky nás zajímají, se nejvíce přibližuje řadě n kruhových, pístově kmitajících desek, jejichž středy jsou na jedné přímce ve vzdálenosti b . V praktických aplikacích se obvykle jednotlivé zářiče (reproduktory) montují těsně vedle sebe. Báze sloupu potom bývá nepatrně větší, než geometrické rozměry zářičů. Matematicky lze dokázat, že směrová funkce S_C řady n kruhových, pístově kmitajících desek (podrobně například v [8] a [9]) je součinem směrové funkce S_1 samostatného zářiče a směrové funkce S_n řady bodových zdrojů.

$$S_C = S_1 \cdot S_n \quad (65)$$

Rovnice (65) platí i pro směrové funkce S_1 zjištěné měřením. To je výhodné v případech, kdy je velice obtížné určit směrovou funkci zářiče analyticky matematickým popisem. U složitých zářičů se proto dnes používá výpočet metodou konečných prvků. Výpočet je relativně obtížný i u velkých reproduktorů s hlubokou membránou nerozvinutelného tvaru a reproduktorů se sektorovou membránou, kde se v závislosti na frekvenci mění mechanická rychlost v jednotlivých profilech membrány a tím se mění i její aktivní průměr (obr.144).



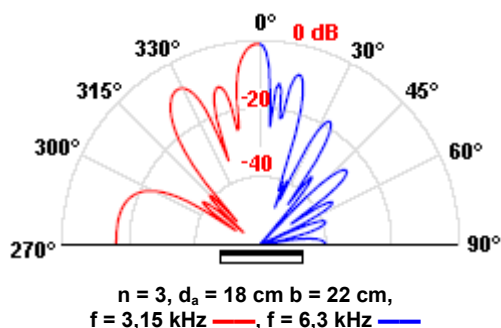
Obr.144 Veličiny z obr.140 na membráně reálného reproduktoru rychlost v nemusí být v závislosti na r konstantní



Obr.145 Směrové funkce řady kruhových desek

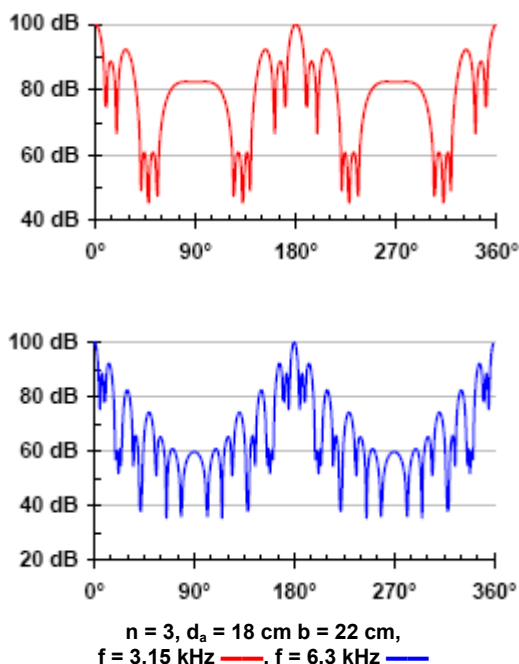
Směrové funkce mají nesporný význam v teorii zářičů a jejich konstruování. Jsou také východiskem pro směrové charakteristiky v hladinovém vyjádření, které se v praxi používají nejčastěji. Nejnázornější je zobrazení směrových charakteristik v polárním grafu (obr.146). Jeho

výhodou je, že i laik získá určitou konkrétní představu, v jakém směru a s jakou "hlasitostí" sloup hraje. Snadno také určíme tzv. vyzařovací úhly, tj. směry, kde hladina akustického tlaku klesne o 10 dB oproti vyzařování v ose.



Obr.146 Směrové charakteristiky reproduktorového sloupu

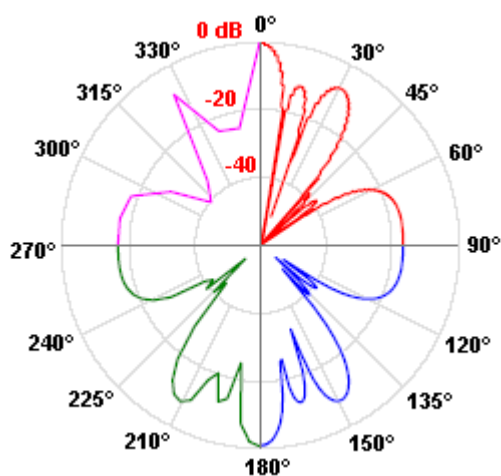
Často se v praxi také setkáváme s vyjádřením směrových charakteristik v kartézské (pravoúhlé) soustavě. Přestože grafy na obr.147 mají stejný informační obsah (významově jsou identické) jako grafy na obr.146, jejich názornost je výrazně menší a pro laiky mají na první pohled téměř nulovou vypovídací hodnotu. V obou případech použítá logaritmická míra lépe koresponduje se sluchovým vnímáním, než směrové funkce s ostrými maximy a zdánlivě užším vyzařovacím diagramem.



Obr.147 Směrové charakteristiky reproduktorového sloupu z obr.146 zobrazení v kartézské soustavě

Přesnost výpočtů z diskrétních hodnot

Při konstrukci grafů směrových funkcí a vyzářovacích charakteristik z diskrétních hodnot je nutné optimalizovat počet kroků výpočtu tak, aby grafy byly přehledné a co nejvíce odpovídaly skutečnosti. Na obr.148 je uveden příklad výpočtu směrové charakteristiky reproduktorového sloupu se třemi zářiči s aktivním průměrem membrány $d_a = 18$ cm a bází $b = 22$ cm za pomoci tabulkového procesoru MS-Excel. Pro výpočet byl použit krok $0,1^\circ, 1^\circ, 3^\circ$ a 10° při frekvenci 3,15 kHz. Pro větší názornost jsou grafy v kvadrantech polárních souřadnic.



Obr.148 Porovnání přesnosti výpočtu směrových charakteristik

reproduktorový sloup
 $n = 3$, $d_a = 18$ cm $b = 22$ cm, $f = 3,15$ kHz
krok výpočtu: $0,1^\circ$ —, 1° —, 3° —, 10° —

Po analýze výsledků (viditelných i v grafu) je zřejmé, že při výpočtech s krokem $\alpha \leq 0,1^\circ$ (min 3 600 bodů) dostaneme zřetelně ohraničené vyzářovací laloky s vyznačenými nulovými směry. Výpočet s krokem 1° (360 bodů) má srovnatelnou přesnost, jen nulové směry nemají tak ostré vyznačení. Výpočet s krokem 3° (120 bodů) je vhodný k pouze prvnímu přiblížení, a to ještě pouze pro relativně nízké frekvence, kdy soustava zářičů nemá mnoho postranních laloků. Výpočty s krokem nad 5° už nemají téměř praktický význam, uvedený příklad výpočtu při kroku 10° (36 bodů) je v praxi prakticky nepoužitelný. Výjimkou jsou výpočty pro frekvence, kdy se zářič chová téměř jako všesměrový, s minimálními změnami vyzářovací charakteristiky.

REPRODUKTOROVÝ SLOUP DPT208

Jak jsme uvedli v [2], DPT208 je malý reproduktorový sloup osazený osmi širokopásmovými reproduktory o průměru 2,5", určený pro vnitřní instalace. Plášť sloupu tvoří tažený hliníkový profil, nastříkaný bílým Komaxitem, do vodících drážek je spolu s krycím děrovaným plechem nasunuta sestava reproduktorů opatřená pružným molitanem. Vnitřní tlumení sloupu je provedeno pruhem netkané textilie (vatelínu). Z obou stran je sloup uzavřen plastovými čely, ve kterých jsou upevňovací matice pro konzoly (obr.149).

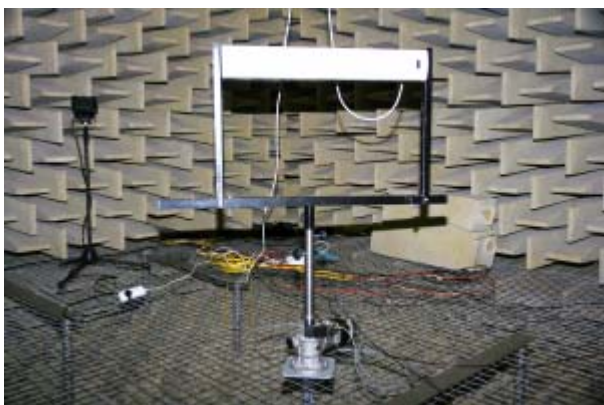


Obr.149 Reproduktorový sloup DPT208 [2]

Katedra technických předmětů Pedagogické fakulty Univerzity Hradec Králové pořídila pro potřeby výuky v předmětu Auditoriologie učeben pro učitele osm reproduktorových sloupů DPT208 z rozvojového projektu FRVŠ 594/2007 pro mobilní výukové pracoviště. Subjektivní hodnocení reprodukce a směrových účinků, po demontáži problematických převodních transformátorů (podrobně v [2]), bylo pozitivní.

V rámci projektu specifického výzkumu PdF 19/2011 jsme ve spolupráci s akustickými laboratořemi FEL ZČU v Plzni, provedli měření frekvenčních a směrových charakteristik reproduktorového sloupu DPT208. Měření byla provedena v bezodrazové komoře akustických laboratoří FEL ZČU, za použití analyzátoru Brüel & Kjaer BK PULSE 3560C (obr.150 a 151).

Výchozí hodnoty pro měření a kontrolní výpočty jsou uvedeny v tabulce 14.



Obr.150 Reprodukční sloup DPT208 instalovaný na točně bezodrazové komory



Obr.151 Řídicí pracoviště bezodrazové komory

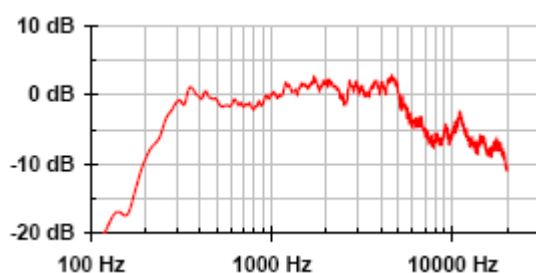
Tab.14 Výchozí hodnoty

parametr	zn.	hodnota
počet reproduktorů	n	8
jmenovitý průměr	d	2,5"
aktivní průměr membrány	d_a	55 mm
báze sloupu	b	72,5 mm
aktivní vyzařovací plocha	S_a	190 cm ²
měřicí vzdálenost	L_m	2,26 m
příkon sloupu při měření	P	1 VA
napájecí napětí	U_{RMS}	4 V
teplota v komoře	T	21,3 °C
relativní vlhkost vzduchu	φ	54 %

Frekvenční charakteristika

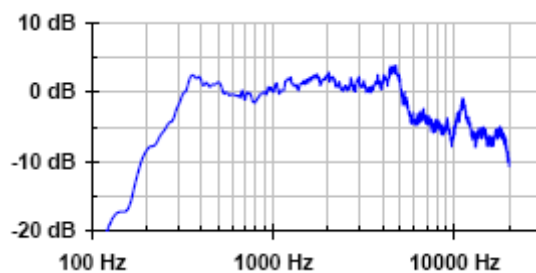
Frekvenční charakteristika byla měřena bílým šumem pomocí FFT (Fast Fourier Transformation). Měřeno 3 200 spektrálních čar v pásmu 6,25 Hz až 20 kHz, $\Delta f = 6,25$ Hz [11]. Způsob upevnění reproduktorů (obr.149), čelní krycí mřížka a její děrování spolu vytvářejí relativně velkou dutinu uvnitř sloupu. Proto byla změřena i frekvenční charakteristika bez krycí mříž-

ky. Výsledky jsou uvedeny v grafech na obrázcích 152-154. Reprodukční sloup DPT208 mají v pásmu 250 Hz až 5,8 kHz vyrovnanou frekvenční charakteristiku, zvlnění nepřesahuje ± 3 dB (referenční frekvence pro všechny charakteristiky $f_0 = 1$ kHz). Při poklesu hladiny akustického tlaku o -6dB dosahuje frekvenční rozsah DPT208 k 15 kHz. Pokles v oblasti nad 5 kHz lze vyrovnat korekcemi přenosové charakteristiky v rámci tzv. sálových korekcí, tyto jsou obvykle nutné pro vyrovnání úrovně sýkavek v důsledku útlumu vysokých frekvencí při šíření vzduchem a pro zachování potřebné srozumitelnosti řeči.

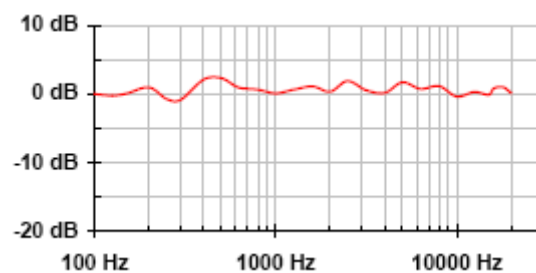


Obr.152 Frekvenční charakteristika DPT208

Drobné změny vykazuje frekvenční charakteristika sloupu bez krycí mřížky (obr.153), ty jsou však vzhledem k předpokládaným aplikacím zanedbatelné. Odchyly charakteristiky od průběhu zobrazeného na obr.152 nepřesahují 2 dB (obr.154).



Obr.153 Frekvenční charakteristika DPT208 bez krycí mřížky



Obr.154 Rozdíly frekvenčních charakteristik průběh je aproximován pro třetinoctávová pásma

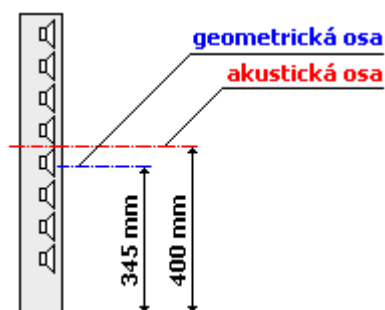
Charakteristická citlivost

Charakteristická citlivost byla měřena v souladu s ČSN IEC 268-5 a ČSN EN 60268-5 různým šumem filtrovaným pro pásmo 150 Hz až 20 kHz, měření v třetinooktávových pásmech, při buzení 1 VA (budicí napětí $U_{RMS} = 4$ V) ve vzdálenosti 2,26 m (přibližně trojnásobek délky sloupu) [11], [12].

Charakteristická citlivost určená analyzátozem v měřicí vzdálenosti 2,26 m je 87,3 dB při příkonu 1 VA. Ekvivalentní charakteristická citlivost ve vzdálenosti 1 m, přepočítaná z průběhu akustického tlaku v akustické ose sloupu v pásmu 400 Hz až 4 kHz je 95,8 dB/1 VA/1 m.

Směrové charakteristiky

Směrové (vyzařovací) charakteristiky reproduktorového sloupu byly měřeny v horizontální a vertikální rovině, nulovým směrem je vždy akustická osa sloupu. Vzhledem k uspořádání zářičů a mechanické konstrukci není akustická osa totožná s osou geometrickou (obr.155). To je také důvod, proč je reproduktorový sloup na točně (obr.150) umístěn zdánlivě asymetricky.



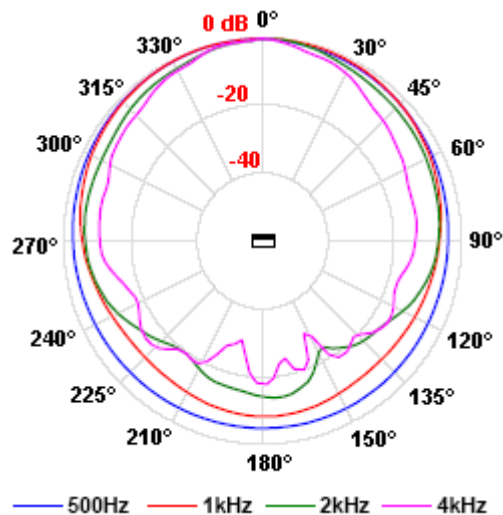
Obr.155 Geometrická a akustická osa DPT208

Pro běžnou instalaci nemá 55mm rozdíl mezi akustickou a geometrickou osou až tak zásadní význam, pro skládané zářiče je však už důležité montovat sloupy "hlavou na sebe", tak aby zůstala zachována báze b po celé délce sloupu.

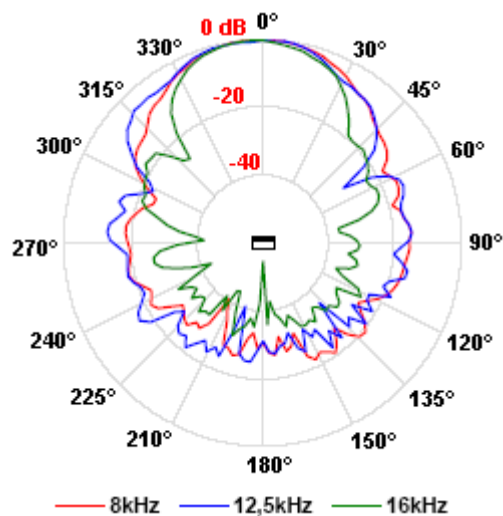
Směrové charakteristiky v horizontální rovině byly měřeny v oktávové řadě 0,5; 1; 2; 4; 8 a 16 kHz. Doplnující měření bylo provedeno pro frekvenci 12,5 kHz (obr.155 a 156).

Měření v oktávové řadě je dostačující, vyzařovací diagramy v předním poloprostoru korespondují s charakteristikami vypočítanými pro

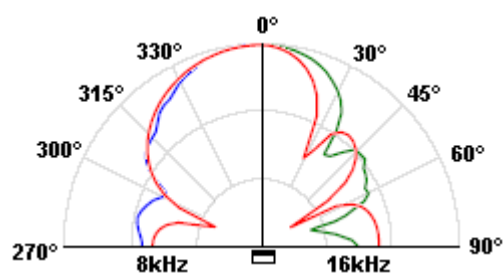
ideální zářič tvaru kruhové pístově kmitající desky. Srovnání charakteristik pro frekvence 8 kHz a 16 kHz je na obrázku 157. Všechny charakteristiky jsou normovány na úroveň 0 dB v akustické ose reproduktorového sloupu.



Obr.155 Směrové charakteristiky DPT208 horizontální rovina v akustické ose



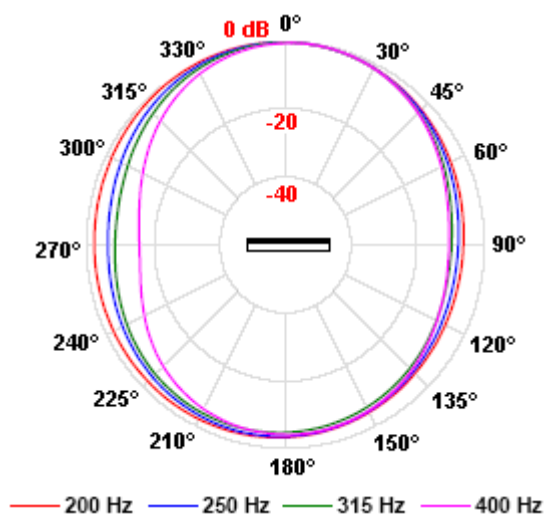
Obr.156 Směrové charakteristiky DPT208 horizontální rovina v akustické ose



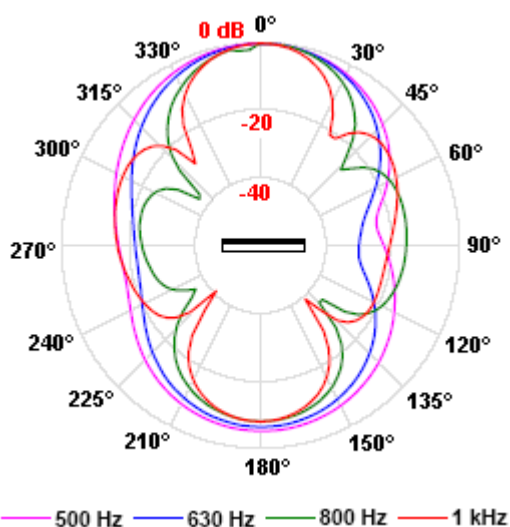
Obr.157 Porovnání horizontálních směrových charakteristik DPT208 a ideálního zářiče vypočítaný teoretický průběh — DPT208: f = 8 kHz —, f = 16 kHz —

Ze změřených a srovnávacích charakteristik lze odvodit, že směrové charakteristiky v horizontální rovině jsou dány směrovými charakteristikami použitých zářičů. Difrakce na čelní krycí mřížce potom způsobují rozšíření vyzařovacího diagramu u vysokých frekvencích. Výraznější směrování sloupu se projevuje až pro pásmo frekvencí nad 4 kHz. Pro frekvence do 8 kHz můžeme uvažovat s horizontálním vyzařovacím úhlem $\gamma_h = 90^\circ$. Při $f = 16$ kHz je $\gamma_h = 60^\circ$.

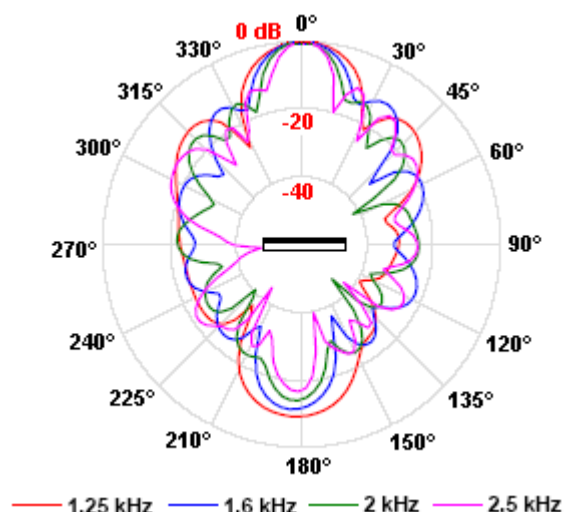
Směrové charakteristiky ve vertikální rovině byly měřeny v třetinooktávové řadě frekvencí od 160 Hz do 20 kHz. Zobrazeny jsou charakteristiky v rozsahu od 200 Hz do 16 kHz, a to v řadě 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800 Hz a 1; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5 a 16 kHz.



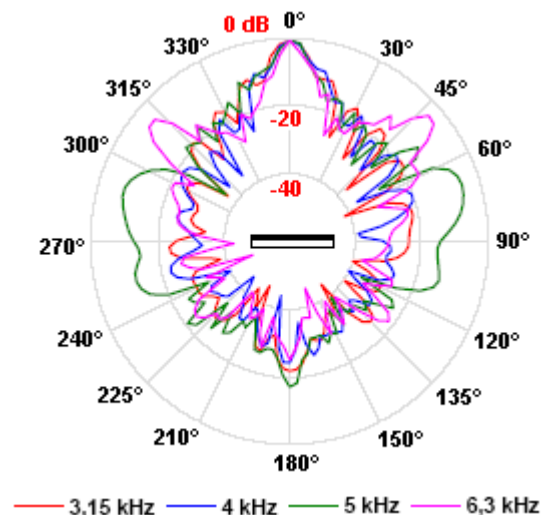
Obr.158 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose



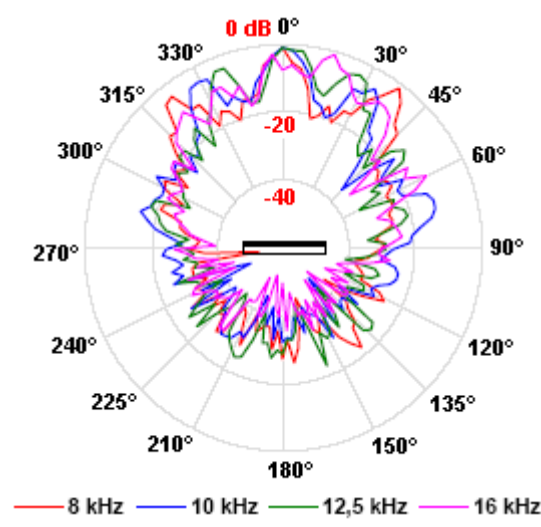
Obr.159 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose



Obr.160 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose



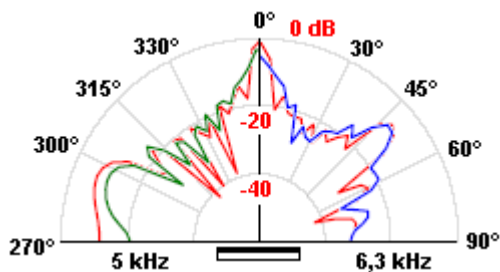
Obr.161 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose



Obr.162 Směrové charakteristiky DPT208
vertikální rovina v akustické ose

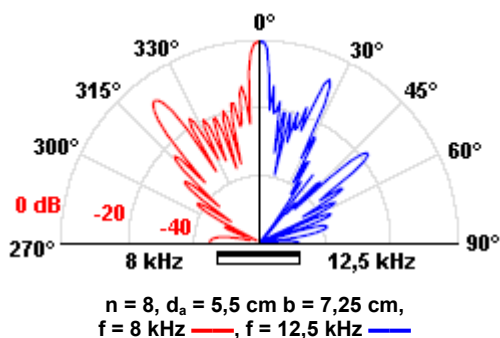
Všechny směrové charakteristiky ve vertikální rovině byly změřeny v souladu s normou ČSN EN 60268-5 signálem sinusového průběhu a stejně jako charakteristiky v rovině vertikální jsou normovány na úroveň 0 dB v akustické ose reproduktorového sloupu.

Změřené vyzařovací charakteristiky ukazují, že směřování akustického signálu nastává již pro frekvence nad 500 Hz. Pro frekvence 800 Hz a vyšší vykazuje DPT208 již výrazné svazkování energie. V oblasti středních a vyšších středních frekvencí (od 1 kHz do 6,3 kHz), tedy v oblasti kde se nacházejí hlasové formanty, lze uvažovat s vyzařovacím úhlem ve vertikální rovině $\gamma_v = 25-30^\circ$. Výrazné boční laloky, v tomto případě v podélné ose sloupu, resp. v úhlu $\pm 45^\circ$, nacházíme při frekvencích 5 kHz a 6,3 kHz.



Obr.163 Porovnání vertikálních směrových charakteristik DPT208 a ideálního zářiče
vypočítaný teoretický průběh —
DPT208: $f = 5 \text{ kHz}$ —, $f = 6,3 \text{ kHz}$ —

Porovnáme-li vyzařovací diagramy změřené ve vertikální rovině v předním poloprostoru sloupu s teoretickými charakteristikami vypočítanými pro ideální zářič řady pístově kmitajících kruhových desek, je zřejmé, že pro frekvence 5 kHz a 6,3 kHz spolu reálné a teoretické charakteristiky korespondují (obr.163). Na změřených charakteristikách jsou méně výrazná minima v tzv. nulových směrech.



Obr.164 Směrové charakteristiky řady pístově kmitajících kruhových desek
 $n = 8, d_a = 5,5 \text{ cm } b = 7,25 \text{ cm,}$
 $f = 8 \text{ kHz}$ —, $f = 12,5 \text{ kHz}$ —

V pásmu vysokých frekvencí, se uplatňují difrakce na čelní mřížce. Pro frekvence od 8 kHz do 16 kHz je tak směrová charakteristika více vyrovnaná, bez výrazných vedlejších laloků.

Na obr.164 jsou pro srovnání vypočítané průběhy řady pístově kmitajících kruhových desek pro frekvence 8 kHz a 12,5 kHz.

MOŽNOSTI APLIKACE VÝSLEDKŮ DO PROCESU VZDĚLÁVÁNÍ

Soubor naměřených hodnot, spolu s výpočty prediktivních charakteristik a jejich variacemi, představuje rozsáhlý materiál, který lze použít nejen pro popis technických parametrů reproduktorového sloupu DPT208 a pro optimalizaci jeho aplikací v nejrůznějších akustických prostorech, ale tato data můžeme využít jako konkrétní příklady při výuce. Uvedené frekvence a směrové charakteristiky budou zejména využívány pro výuku v předmětu Auditoriologie učeben pro učitele. Cílem předmětu je seznámit studenty s auditoriologií nejen jako s vědním oborem, ale též ukázat nutnost jejího těsného propojení s oborovými didaktikami, včetně možné aplikace komunikačních modelů při řešení přenosových kanálů učeben [13].



Obr.165 Analyzátor NTi XL2

Studenti se na konkrétních příkladech reálných směrových charakteristik seznámí s jejich významem a s postupem návrhu řešení ozvučení při využití naměřených hodnot a simulovaných průběhů. Zároveň si mohou chování reproduktorových sloupů ověřit přímo v praxi. V rámci řešení projektu specifického výzkumu získala katedra technických předmětů moderní analy-

zátor NTi XL2 (obr.165). Studenti tak mohou během krátkého času provést několikanásobná akustická měření. Zpracování výsledků potom provedou v rámci seminárních prací nebo projektových úkolů, podobně jako v modelových úlohách uvedených v [11], [12].

Možnost prakticky přímého srovnání různých řešení ozvučovacího systému (které umožňuje náš mobilní komplex a jeho variabilita), včetně okamžitého záznamu naměřených hodnot, je nenahraditelnou osobní zkušeností. Výuka se tím posouvá na zcela jinou kvalitativní úroveň, přičemž za mimořádně významný považujeme právě posun k praktickým aplikacím. Součástí praktických aplikací je i softwarová podpora pro hodnocení prostorových parametrů učeben a jejich akustiky.

ZÁVĚR

Na základě podrobné analýzy výsledků měření, porovnání naměřených hodnot s teoretickými předpoklady a z výsledků provozních zkoušek můžeme konstatovat, že reproduktorový sloup DPT208 představuje akustický záříč s dobrými přenosovými vlastnostmi a směrovými charakteristikami, který je plně srovnatelný s jinými (a mnohdy výrazně dražšími) pasivními reproduktorovými sloupy osazenými širokopásmo-

vými reproduktory. Také srovnání cena/výkon řadí DPT208 mezi nejlepší produkty ve své kategorii. Připomínáme ovšem, že námi publikované výsledky se vztahují na DPT208 bez převodního transformátoru [2]. Pochopitelně není možné je srovnávat s digitálně řízenými reproduktorovými sloupy Iconyx nebo EAW, které jsou ale více jak stonásobně dražší.

DPT208 představuje velmi dobrý základ pro návrh ozvučovacích systémů pro přenos řeči (a případně hudební kulisy). Je také mimořádně vhodnou alternativou standardně dodávaného ozvučení interaktivních tabulí, kde díky směrovému vyzářování zvyšuje dosažitelnou srozumitelnost a omezuje energii difúzního pole. Při samostatné instalaci je vhodný pro dosah kolem 12 m.

V dalším pokračování se zaměříme na problematiku skládaných akustických záříčů, realizovaných z reproduktorových sloupů DPT 208, a to v několika verzích.

Článek byl vytvořen s podporou projektu specifického výzkumu SV PdF 19/2011 Predikce směrových charakteristik skládaných akustických záříčů a možnosti jejich využití pro ozvučovací systémy učeben.

Autoři děkují Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za odbornou a technickou pomoc při měření v akustických laboratořích FEL ZČU.

Použité zdroje

- [1] DRTINA, R. - MANĚNA, V. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 6. - Reproduktorové sloupy*. Media4u Magazine. 1/2008. s.9-19. ISSN 1214-9187.
- [2] DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 7. - Linkové transformátory*. Media4u Magazine. 3/2009. s.38-49. ISSN 1214-9187.
- [3] DRTINA, R. - MANĚNA, V. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 5. - Vybíráme reproduktorové soustavy*. Media4u Magazine. 4/2007. s.8-17. ISSN 1214-9187.
- [4] ONKYO. *AV Receiver TX-NR808. Instruction Manual*. Onkyo Corporation Japan. SN 29400329.
- [5] THX Lucas Films. *New THX Certification Category: Small is Big*. [cit.2012-01-12] Dostupné z WWW: <<http://www.thx.com/>>
- [6] AUDYSSEY. *MultEQ*. [cit.2012-01-12] Dostupné z WWW: <<http://www.audyssey.com/>>
- [7] CHROMÝ, J. *Materiální didaktické prostředky v informační společnosti*. Praha. Verbum. 2011. ISBN 978-80-904415-5-2.
- [8] TUREČEK, O. *Poslech v domácích studiích*. In Muzikus. 2006, roč.XVI, č.4, s.6-19, ISSN 1210-1443.
- [9] MERHAUT, J. *Teoretické základy elektroakustiky*. Praha. Academia. 1985.
- [10] ŠKVOR, Z. *Akustika a elektroakustika*. Praha. Academia. 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [11] TUREČEK, O. *Měření parametrů reproduktorů*. In Setkání uživatelů PULSE. Praha. Spectris. 2005. s.97-101. ISBN 80-239-4909-8.
- [12] TUREČEK, O. *Měření zkreslení elektrodynamických reproduktorů*. In 5. setkání uživatelů PULSE. Praha. Spectris. 2007. s. 170-173. ISBN 978-80-237-9240-3.
- [13] CHROMÝ, J. - DRTINA, R. *Vybrané souvislosti výuky a přenosového modelu komunikace*. Media4u Magazine. 4/2010. s.89-92. ISSN 1214-9187.

Kontaktní adresy

PaedDr. René Drtina, Ph.D. e-mail: rene.drtina@uhk.cz
doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc. e-mail: jaroslav.lokvenc@uhk.cz
Tomáš Provazník
Michal Švandrlík

Katedra technických předmětů PdF UHK
Rokitanského 62
500 03 Hradec Králové

René Drtina - Jaroslav Lokvenc

Katedra technických předmětů, Pedagogická fakulta, Univerzita Hradec Králové
Department of Technical subjects, Faculty of Education, University of Hradec Kralove

Abstrakt: Článek se zabývá principiálním řešením ozvučovacích soustav velkých auditorií (učebny a přednáškové sály). Uvádí výhody, nevýhody a podmínky funkce jednotlivých typů ozvučovacích soustav, způsob řešení i specifické požadavky pro velké ozvučovací systémy. Devátá část je věnována problematice směrových charakteristik skládaných zářičů.

Abstract: This article deals with the fundamental solution of the sound systems for large areas (schoolrooms and lecture auditoriums). It shows advantages, drawbacks and conditions for their capacity of single types of the sound system, ways of solving and specific requirements for large sound systems. The ninth part concerns with the issue of directional characteristics of the folded acoustic emitters.

Klíčová slova: Směrová charakteristika, skládaný zářič, reproduktorová stěna, ozvučovací systém.

Keywords: Directional characteristics, folded acoustic emitters, wall speaker, sound system.

ÚVOD K DEVÁTÉ ČÁSTI

Seznámení se směrovými akustickými zářiči typu reproduktorového sloupu bylo uvedeno v [1]. K tomuto tématu jsme se vrátili o rok později v souvislosti s hledáním příčin nepříliš uspokojivého zvuku malých reproduktorových sloupů, dodávaných pod různým označením řadou obchodních a montážních firem [2].

V roce 2011 jsme s finanční podporou projektu specifického výzkumu (SV PdF 19/2011) *Predikce směrových charakteristik skládaných akustických zářičů a možnosti jejich využití pro ozvučovací systémy učeben* mohli detailně popsat vlastnosti námi upravených reproduktorových sloupů DPT208. Cílem výzkumu bylo ověřit soulad teoretických předpokladů s reálnými vyzářovacími charakteristikami reproduktorových sloupů a z nich skládaných zářičů. Klasické reproduktorové sloupy jsou neprávem opomíjené zářiče, s příznivými akustickými vlastnostmi a z nich skládané reproduktorové stěny se dnes prakticky nepoužívají.

Rozsáhlý výzkum, který v roce 2012 realizoval Chromý [3], potvrdil naše předpoklady, že většina dodavatelů ozvučovacích systémů nejenže reproduktorové sloupy a skládané zářiče nepoužívá, ale ani u jiných akustických zářičů nejsou

schopni doložit (kromě maximálního výkonu a frekvenčního rozsahu bez udané tolerance) potřebné technické parametry, zejména pak frekvenční a směrové charakteristiky.

Cílem devátého pokračování seriálové publikace *Ozvučovací systémy pro velká auditoria* je uvést příklady možných řešení skládaných akustických zářičů, sestavených z reproduktorových sloupů DPT208, které by v učebnách a posluchárnách mohly přispět ke zlepšení přenosových vlastností komunikačního kanálu. Jak jsme uvedli v předcházející části [1], patří zpravidla učebny a posluchárny mezi prostory bez odpovídajících akustických úprav a s nadlimitní dobou dozvuku. Je-li jejich tlumení zajištěno pouze přítomností žáků či studentů, vytváříme tím značně proměnlivé akustické prostředí, s energetickou převahou dozvukového signálu v dolní části spektra.

Výsledky rozsáhlého výzkumu v oblasti přenosových vlastností učeben, který jsme realizovali v letech 2000-2010, ve většině případů ukázaly nevyhovující parametry, a to i u jazykových učeben, kdy se slabiková srozumitelnost řeči pohybuje hluboko pod úrovní 90 % [4]. Pro zajištění velmi dobré větné srozumitelnosti bychom měli požadovat slabikovou srozumitelnost na minimální úrovni 92 %.

Všude tam, kde komunikace obsahuje primárně neznámé pojmy, ať už v mateřské řeči a tím více při výuce jazyků, považujeme za ideální stav dosažení slabikové srozumitelnosti na úrovni 98 %. Jsme si plně vědomi toho, že takový požadavek je do značné míry maximalistický a jeho splnění vyžaduje provedení náročných akustických úprav prostoru učebny a pro velká auditoria je prakticky nedosažitelný. Přes to všechno, považujeme-li vzdělání a úroveň vzdělanosti za důležitý prvek rozvoje společnosti, nesmíme význam kvalitativních parametrů komunikačního přenosového kanálu podceňovat.

PROSTORY S DLOUHÝM DOZVUKEM

S prostory s dlouhou dobou dozvuku se v praxi setkáváme relativně často. Kromě akusticky neupravených učeben to jsou tělocvičny, nádražní haly, obřadní síně, prostory sakrálních staveb, sály na zámcích a hradech (obr.166, 167), ale také



Obr.166 Mramorový sál zámku Karlova Koruna
(doba dozvuku prázdného sálu přes 6,5 s)
[převzato z www.kinskycastles.com]



Obr.167 Eliptický sál zámku Humprecht
(doba dozvuku prázdného sálu přes 10 s)
[převzato z www.humprecht.cz]

"kongresové" a "konferenční" prostory adaptované v historických a památkově chráněných objektech (obr.168, 169).



Obr.168 Sloupová síň zámku Štířín
[převzato z www.a-techservice.cz]



Obr.169 Konferenční sál v Novém Adalbertinu
[převzato z www.noveadalbertinum.cz]

Uvedené příklady představují akusticky problematické prostředí, ve kterém nelze ke kvalitnímu ozvučení použít jednoduché reproduktorové soustavy s širokými vyzařovacími úhly, přestože se pro tyto účely běžně používají. Jediný způsobem, jak potlačit energii dozvukového pole, je vyzařovat akustický signál s minimální možnou úrovní (zbytečně nezvyšovat hladinu hlasitosti) do jediné pohltivé plochy - auditoria [5].

V řadě případů se však s problematickou akustikou prostoru setkáváme i u nově rekonstruovaných a nově postavených učeben. Příkladem totálního nezvládnutí nejen prostorové akustiky, ale i celé auditoriologie učebny může být nově rekonstruovaná posluchárna E17 Ústavu sociální práce UHK. Při jejím návrhu nebyla do projektových prací zahrnuta akustická studie a následně tak nebyly provedeny potřebné akustic-

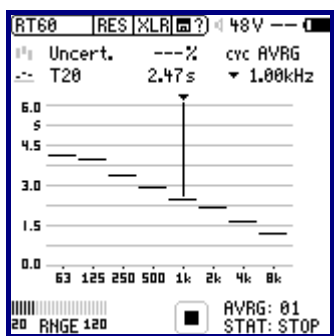
ké úpravy podle požadavků ČSN 73 0527 [6] a ČSN 73 0525 [7].

Zpřísněné požadavky aktualizovaných norem jsou jednoznačným přínosem ke zvýšení srozumitelnosti řeči v učebnách, posluchárnách, jim odpovídajících přednáškových sálech a v kongresových centrech. Norma ČSN 73 0527 [6] nově stanovuje dobu dozvuku pro učebny o objemu do 250 m^3 $T_d = 700 \text{ ms}$. Pro sály s objemem nad 250 m^3 se přípustná doba dozvuku zvětšuje, ale nesmí přesáhnout $1\ 100 \text{ ms}$ pro sály s objemem nad $6\ 000 \text{ m}^3$.

V učebně s podlahovou plochou 62 m^2 o objemu $182,5 \text{ m}^3$ ($10,70 \times 5,76 \times 2,96 \text{ m}$, obr.170) jsme analyzátořem NTi XL2, při použití impulzní metody, naměřili dobu dozvuku $4,2 \text{ s}$ (obr.171).



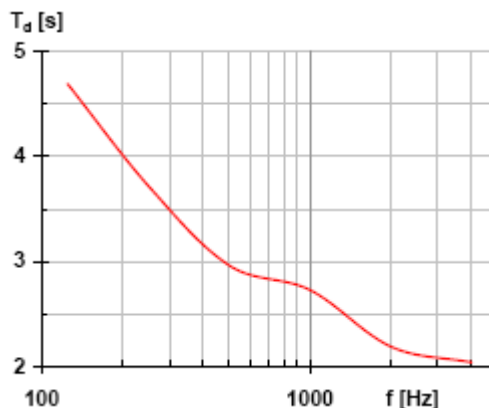
Obr.170 Interiér učebny E17



Obr.171 Změřená doba dozvuku oktávová pásma, analyzátoř NTi XL2

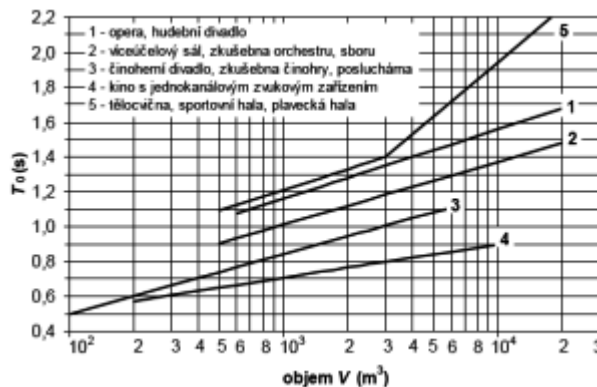
Prakticky totožné výsledky dává kontrolní výpočet doby dozvuku podle Millingtona. Vzhledem k relativně malému objemu učebny jsme při výpočtu neuvažovali útlum šíření vzduchem a započítány nejsou některé detaily (např. povrchy a

dutiny zářivkových svítidel, dolní hrany okenních parapetů nebo věšáky na zadní stěně učebny). Norma přitom uvažuje s jednodušším výpočtem doby dozvuku podle Eyringa. Grafické znázornění výsledků výpočtu je na obr.172.

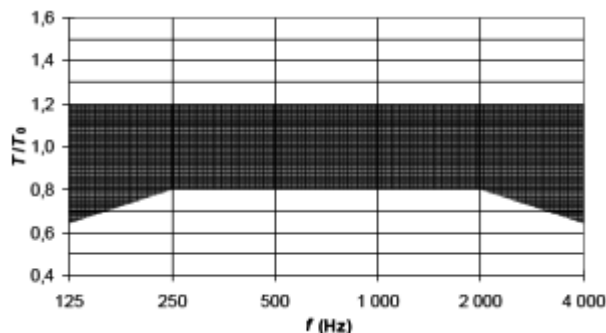


Obr.172 Vypočítaná doba dozvuku oktávová pásma, výpočet dle Millingtona

Optimální doby dozvuku učeben podle objemu a přípustné odchylky podle ČSN 73 0527 [6] jsou uvedeny na obr.173 a 174. Za optimální bychom však považovali dobu dozvuku $T_d = 450 \text{ ms}$ podle tabulky 2 v [6] pro jazykovou učebnu.



Obr.173 Optimální doby dozvuku podle ČSN 73 0527 [6]



Obr.174 Toleranční pole doby dozvuku podle ČSN 73 0527 pro přenos řeči [6]

Ignorování normativních požadavků následně vede ke zcela nevyhovujícím akustickým podmínkám a výuka v takovém prostředí je když ne nemožná, tak velice problematická. Přitom článek 5.4 ČSN 73 0527 Adaptované prostory uvádí: „Jde-li o adaptaci uzavřeného prostoru se změnou původního účelu jeho využívání, musí vlastnícímu řešení akustiky předcházet studie vedoucí k závěru, že v daném prostoru jsou požadavky této normy splnitelné“ [6].

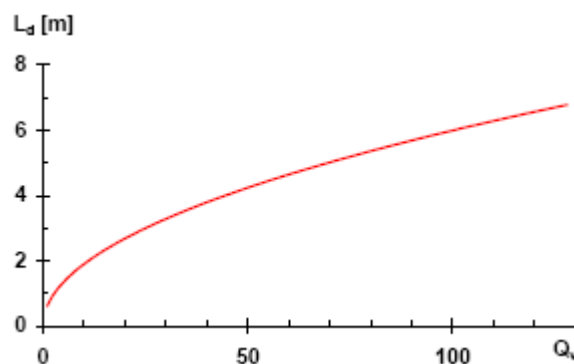
Následně pak v článku 5.5 Ozvučované prostory je uveden požadavek, že „v případě, že prostor má být vybaven ozvučovacím systémem, je třeba, aby vlastnosti tohoto systému byly přizpůsobeny řešení akustiky prostoru ... je žádoucí, aby v kterékoli místě poslechu převažovala intenzita přímého zvuku reproduktorů nad intenzitou odražených vln. Pro dosažení dobré srozumitelnosti řeči v posluchárnách a víceúčelových sálech je vhodný centrální systém ozvučení, pokud to okolnosti dovolují“ [6].

Z výše uvedených požadavků vyplývá, že posluchači by se měli nacházet v oblasti volného pole. Od zářiče (reproduktoru/reproduktorové soustavy) by tedy měli být ve vzdálenosti menší, než je dozvuková vzdálenost L_d (obr.33, [8]) Při známém objemu prostoru V a době dozvuku T_d , můžeme pro určení dozvukové vzdálenosti L_d použít rovnici (10) [8]

$$L_d = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T_d} \cdot Q_v \cdot Q_p}$$

Jak z uvedené rovnice vyplývá, je možné dozvukovou vzdálenost relativně výrazně ovlivnit činitelem směrovosti akustického zářiče Q_v . Ukažme si to na příkladu učebny E17 v pásmu základního tónu řeči, tj. 250-500 Hz. Pro objem učebny $V = 182,5 \text{ m}^3$ a dobu dozvuku $T_d = 3,3 \text{ s}$ vychází, při $Q_v = 2,5$ a $Q_p = 2$, dozvuková vzdálenost $L_d = 95 \text{ cm}$. Nevyhovující poslechové podmínky tak budou mít už studenti v první řadě. Při použití vysoce směrových zářičů, např. s činitelem směrovosti $Q_v = 24$, se dozvuková vzdálenost zvětší na 294 cm, což ale není ani třetina délky učebny.

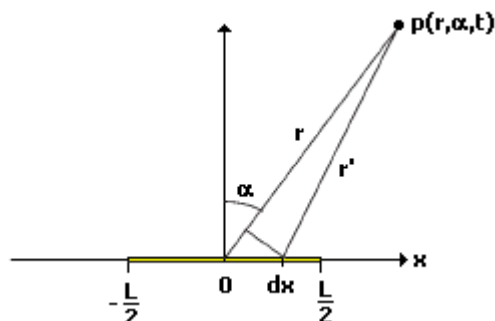
Zvětšování dozvukové vzdálenosti v závislosti na činitelem směrovosti zářiče Q_v ukazuje graf na obr. 175. Z uvedeného příkladu můžeme odvodit, že akustické zářiče s velkou směrovostí mohou sice v akusticky problematických prostorech částečně pomoci, úpravu prostorové akustiky ale nenahradí.



Obr.175 Teoretická závislost dozvukové vzdálenosti v učebně E17 na činitelem směrovosti zářiče

ÚZCE SMĚROVÉ SYSTÉMY

Přes veškerý pokrok a nové možnosti, které přináší digitální technologie, nelze překročit platné fyzikální zákony, a ani módní trendy v návrhu ozvučovacích systémů (např. Line-Array) nejsou univerzálně použitelné, byť se tak používají. Jak jsme ukázali u reproduktorových sloupů [1], je v rovině procházející osou sloupu jejich směrovost daná počtem zářičů a délkou sloupu. Směrovost v rovině kolmé na osu sloupu je potom prakticky určena směrovostí jednotlivých zářičů. Podobně se chovají i velké skládané Line-Array systémy. Feistel, Thompson a Ahnert [9] vytvořili model vyzařovacích charakteristik Line-Array systémů a ověřili jeho shodu s reálnými instalacemi. Pro vyzařovací diagram odvodili z teorie ideálního lineárního zářiče konečné délky (obr.176) a rovnice komplexního akustického tlaku (66), že pro systémy Line-Array délky L , složené z M modulů můžeme pro komplexní akustický tlak ve vzdáleném poli uvažovat hodnotu podle (67) [9]



Obr.176 Ideální lineární zářič konečné délky

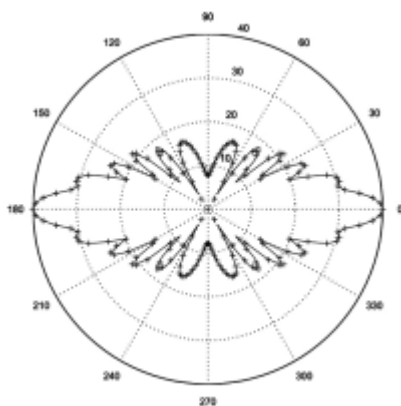
$$\tilde{p}(r, \alpha, t) = \frac{\tilde{A}_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} \int_{-L/2}^{L/2} e^{jkx \sin \alpha} dx \quad (66)$$

$$\tilde{p}(r, \alpha, t) = \tilde{A}_0 \sum_{n=1}^M \frac{1}{r_n} e^{j(\omega t_n - kr_n)} \int_{-L/2}^{L/2} e^{jkx \sin \alpha_n} dx \quad (67)$$

což lze upravit na (68)

$$\tilde{p}(r, \alpha, t) = \tilde{A}_0 L \sum_{n=1}^M \frac{1}{r_n} e^{j(\omega t_n - kr_n)} \frac{\sin\left(\frac{1}{2} kL \sin \alpha_n\right)}{\frac{1}{2} kL \sin \alpha_n}$$

Příklad vypočítané (+) a změřené charakteristiky je na obr.177.



Obr.177 Modelový příklad vyzářovacího diagramu systému Line-Array [9]

$f = 2$ kHz, vyzářování z pohledu posluchače

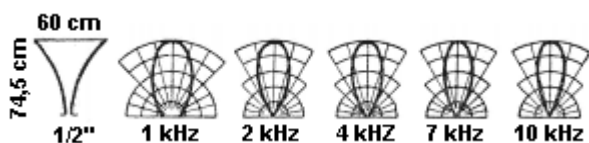
Podrobné odvození s příklady směrových charakteristik je uvedeno v [9].

(pozn.aut.)

Požadujeme-li relativně úzkou směrovou charakteristiku v horizontální i vertikální rovině, máme reálně k dispozici tři typy zářičů. Nejstarším, ale dodnes používaným typem je exponenciální zvukovod kruhového průřezu. Pro tento zvukovod odvodil Stenzel [10] směrovou funkci ve tvaru

$$\Gamma = J_0\left(\frac{\kappa d \sin \alpha}{2}\right) \quad (69)$$

kde je J_0 Besselova funkce nultého řádu, κ charakteristická konstanta zvukovodu, d výstupní průměr a α úhlová odchylka od osy zvukovodu.



Obr.178 Vyzářovací diagramy exponenciálního zvukovodu [11]

Jak ukázal Dreizen [11], lze při vhodné volbě parametrů dosáhnout prakticky konstantního vyzářovacího úhlu (obr.178). Současné exponenciální zvukovody jsou tak již zpravidla navrhovány jako zvukovody s konstantním vyzářovacím úhlem (constant directivity horn). Nevýhodou zvukovodů jsou především značné rozměry při požadavku velké směrovosti a přenosu nižších frekvencí. Jediný reproduktor s přímým exponenciálním zvukovodem kruhového průřezu, vyráběný v bývalé ČSSR, byl typ Tesla ART 300 (obr.179).

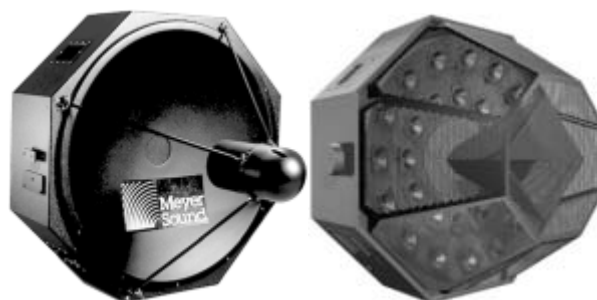


Obr.179 Tlakový reproduktor Tesla ART 300 s exponenciálním zvukovodem [12]

Tři tyto reproduktory postačovaly k ozvučení Letenské plázně v Praze.

(pozn.aut.)

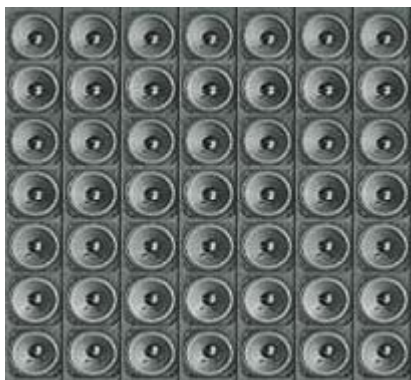
Dalším typem zářiče s úzkou směrovou charakteristikou je parabolický zářič. V praxi se používá všude tam, kde je potřeba zajistit velký dosah ozvučovacího systému (např. na stadionech, volných prostranstvích, atd.). Parabolické reproduktory pro tzv. průmyslové instalace a koncertní turné vyrábí firma Meyer Sound, typ SB-1 (cena 22 530 \$, cca 550 000 Kč) má frekvenční rozsah 500 Hz až 15 kHz v tolerančním pásmu ± 4 dB a vyzářovací úhel 10° [13].



Obr.180 Parabolické reproduktory Sound Beam SB-1 a SB-2 fy Meyer Sound [13], [14]

SB-2 (cena 15 670 \$, cca 320 000 Kč) potom disponuje frekvenčním rozsahem 150 Hz až 13 kHz v tolerančním pásmu ± 4 dB a 130 Hz až 18 kHz v pásmu -6 dB. Vyzařovací úhly jsou 90° pro $f > 250$ Hz, 40° pro $f > 500$ Hz a 20° pro $f = 1$ až 16 kHz. Oba zářiče mají čelní rozměr přibližně 120×120 cm a váží necelých 140 kg (obr.180).

Třetí možné řešení akustického zářiče s relativně úzkou směrovou charakteristikou představuje reproduktorová stěna (obr.181).



Obr.181 Modelová reproduktorová stěna 7x7

REPRODUKTOROVÁ STĚNA

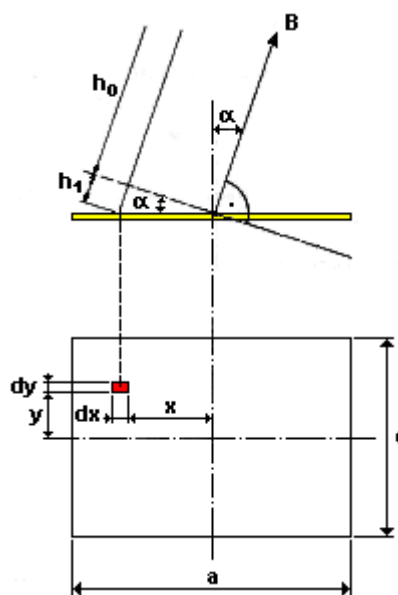
V technice ozvučování učeben, poslucháren a jiných prostorů s delší dobou dozvuku nebo prostorů jejichž délka výrazně přesahuje ostatní rozměry, představuje reproduktorová stěna obvykle prostorově nepříliš náročné a relativně levné řešení. To samozřejmě platí v případě, že uvažujeme klasickou pasivní reproduktorovou stěnu a nikoliv digitálně řízené systémy. Jak je uvedeno např. v [6], nejčastěji se reproduktorové stěny skládají z reproduktorových sloupů. I tak se ale v praxi reproduktorové stěny téměř nepoužívají, sériově se nevyrábějí a na zakázku se zhotovují zcela výjimečně. Jak ukázaly výsledky některých výzkumů [3] [16], nemají je v nabídce ani firmy, dodávající audiovizuální vybavení učeben tzv. na klíč.

Směrové charakteristiky reproduktorové stěny

Jak jsme již uvedli v [1] jsou směrové charakteristiky zářičů důležitým parametrem při hodnocení pokrytí plochy auditoria vyzařovaným signálem a pro profesionální návrh ozvučovací soustavy jsou nezbytné. Stejně jako u reproduktorových sloupů, určujeme i u reproduktorových stěn směrové funkce ve vertikální a horizontální rovině. Jak vyplývá z komplexního modelu [9], lze i

u reproduktorové stěny předpokládat řadu nulových směrů a vyzařovacích laloků.

V ideálním případě můžeme reproduktorovou stěnu považovat za obdélníkovou kmitající desku. Pro teoretické odvození směrové funkce uvažujeme bod B ve vzdálenosti h_0 od středu kmitající desky, přičemž současně platí $h_0 \gg a$, $h_0 \gg c$. Spojnice bodu B svírá s osou procházející kolmo středem desky obecný úhel γ . Průměty úhlu γ k osám obdélníku jsou α a β . Za předpokladu, že $\beta = 0$, platí $\gamma = \alpha$ (obr.182).



Obr.182 K odvození směrové funkce reproduktorové stěny [17]

Potom $h_1 = x \cdot \sin \alpha$ a $dS = dx \cdot dy$. Pro $h_1/h_0 \ll 1$ a pístovém pohybu celé desky (všechny body se pohybují stejnou rychlostí v), můžeme pro rychlostní potenciál Φ_α psát podobně jako u kmitající kruhové desky (viz odvození v [1]) rovnici

$$\Phi_\alpha = -\frac{v \cdot e^{-jk h_0}}{2\pi h_0} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-c/2}^{c/2} e^{-jk x \sin \alpha} dx dy \quad (70)$$

po integraci podle y dostaneme [17]

$$\Phi_\alpha = -\frac{v \cdot e^{-jk h_0}}{2\pi h_0} \cdot c \int_{-a/2}^{a/2} e^{-jk x \sin \alpha} dx \quad (71)$$

Rovnice (71) pro rychlostní potenciál Φ_α má potom řešení

$$\Phi_{\alpha} = -\frac{v \cdot e^{-jkh_0}}{2\pi h_0} \cdot c \frac{\sin\left(\frac{ak}{2} \sin \alpha\right)}{\frac{k}{2} \sin \alpha} \quad (72)$$

Směrová funkce S_{α} podle rovnice (62) [1] a zavedení $k = 2\pi/\lambda$ má tvar

$$S_{\alpha} = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha} \quad (73)$$

a je nezávislá na rozměru c kmitající obdélníkové desky. Analogicky potom pro $\alpha = 0$, kdy $\gamma = \beta$, dostaneme směrovou funkci

$$S_{\beta} = \frac{\sin\left(\frac{\pi c}{\lambda} \sin \beta\right)}{\frac{\pi c}{\lambda} \sin \beta} \quad (74)$$

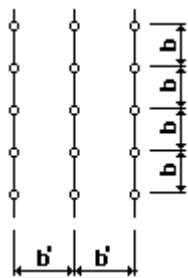
Pro obecný směr γ , kdy současně $\alpha \neq 0$ a $\beta \neq 0$, je směrová funkce S_{γ} zářiče tvaru obdélníkové desky podle (65) [1]

$$S_{\gamma} = S_{\alpha} \cdot S_{\beta} \quad (75)$$

což po dosazení (73) a (74) do (75) dá směrovou funkci ve tvaru

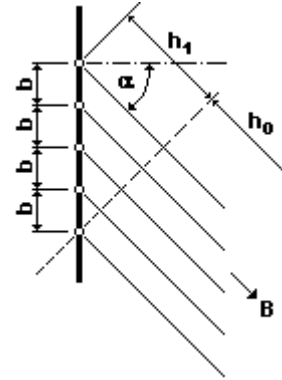
$$S_{\gamma} = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi c}{\lambda} \sin \beta\right)}{\frac{\pi c}{\lambda} \sin \beta} \quad (76)$$

Předpokládejme reproduktorovou stěnu složenou z bodových zdrojů (obr.183).



Obr.183 Stěna z bodových zářičů

Rozestup zářičů ve vertikální ose (tzv. báze sloupu) b je konstantní, stejně tak je konstantní rozestup v horizontálním směru b' . Toto uspořádání je typické pro stěny skládané z reproduktorových sloupů. Směrové charakteristiky jsou standardně udávány ve vertikální a horizontální rovině procházející akustickou osou zářiče. Pro jejich odvození platí postupy uvedené v [17] [18].



Obr.183 K odvození vertikální směrové funkce

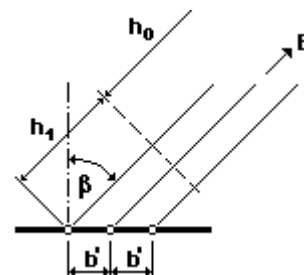
Směrová funkce S_V ve vertikální rovině je dána rovnicí [1]

$$S_V = \frac{\sin\left(\frac{\pi n b}{\lambda} \cdot \sin \alpha\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \cdot \sin \alpha\right)} \quad (77)$$

kde n je počet zdrojů ve vertikálním směru. Analogicky je potom směrová funkce S_H v horizontální rovině dána rovnicí

$$S_H = \frac{\sin\left(\frac{\pi m b'}{\lambda} \cdot \sin \beta\right)}{m \cdot \sin\left(\frac{\pi b'}{\lambda} \cdot \sin \beta\right)} \quad (78)$$

kde m je počet zdrojů v horizontálním směru (obr.184).



Obr.184 K odvození horizontální směrové funkce

Použijeme-li místo bodových zdrojů reálné zářiče s vlastní směrovou funkcí S_1 (viz rovnice (63) v [1]), budou výsledné směrové funkce

$$S_V = S_1 \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi n b}{\lambda} \cdot \sin\alpha\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \cdot \sin\alpha\right)} \quad (79)$$

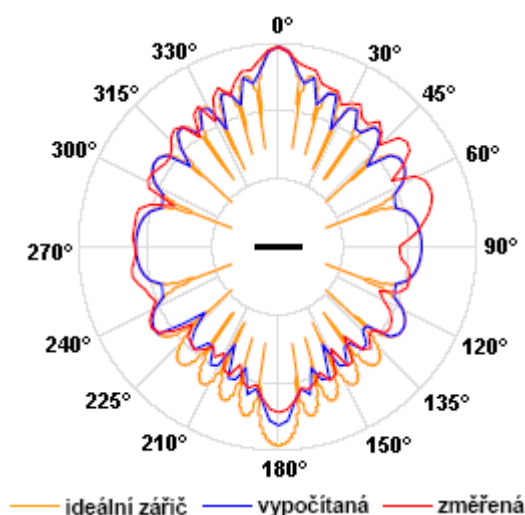
$$S_H = S_1 \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi m b'}{\lambda} \cdot \sin\beta\right)}{m \cdot \sin\left(\frac{\pi b'}{\lambda} \cdot \sin\beta\right)} \quad (80)$$

Teoretické řešení má samozřejmě svoje opodstatnění pro řešení složitých akustických systémů, na druhé straně si ale také musíme uvědomit, že vyzářovací laloky a nulové směry vypočítané ze směrových funkcí platí vždy pouze pro jedinou frekvenci. Vezmeme-li tedy v úvahu širokospektrální signál (řeč, hudba), bude mít výsledná směrová charakteristika v určitém frekvenčním pásmu charakter obalové plochy složené z diskretních průběhů mnoha směrových funkcí.

Jestliže vytvoříme reproduktorovou stěnu z relativně malých reproduktorů, potom při jejich těsné montáži (obr.181) můžeme, s jistým přiblížením, vyjádřit směrovou funkci zářiče stejně jako u obdélníkového zdroje s rozměry $a \times c$, kde a je tzv. aktivní délka sloupu, která se rovná délce řady reproduktorů [8]. Analogicky lze tak zavést i aktivní šířku c a přiblížit se rovnicím (73) a (74). Při určitém zjednodušení můžeme uvažovat, že $a = n \times D$, kde D je vnější průměr reproduktoru, přičemž $b = D$. Pro reproduktorovou stěnu s těsnou montáží jednotlivých zářičů potom uvažujeme, že $a = n \times D$, $c = m \times D$, při $b = b' = D$. Pro eliptické reproduktory s rozměry $B \times H$ potom platí $a = n \times H$, $c = m \times B$ (montáž naležato).

Na obrázku 185 je příklad porovnání směrových charakteristik (vyzařovacích diagramů) při frekvenci 4 kHz pro ideální zářič tvaru dokonale tuhé obdélníkové desky o rozměrech 70×70 cm (výpočet v krocích po $0,1^\circ$), skládaného zářiče z 32 reproduktorů o průměru 2,5" s $b = 72,5$ mm a $b' = 150$ mm (výpočet s krokem 1°) a reálné reproduktorové stěny, složené ze čtyř reproduktorových sloupů DPT208. Z porovnání směrových charakteristik vyplývá velmi dobrá shoda mezi vypočítanými průběhy ideálního a skládaného zářiče.

Velmi dobrá shoda je i mezi vypočítanými a reálně naměřenými charakteristikami. Drobné odchylky jsou způsobeny vnitřní konstrukcí sloupů, rozptylem na krycí mřížce a upevňovacími prvky. V porovnání s ideálním zářičem nemá zjednodušený výpočet ani reálná sestava výrazné nulové směry. Pro spojitý signál je jejich význam v praxi zanedbatelný. Potlačení vyzářování mimo akustickou osu v předním poloпростoru je až 20 dB, potlačení vyzářování v zadním poloпростoru je až 40 dB.



Obr.185 Porovnání směrových charakteristik

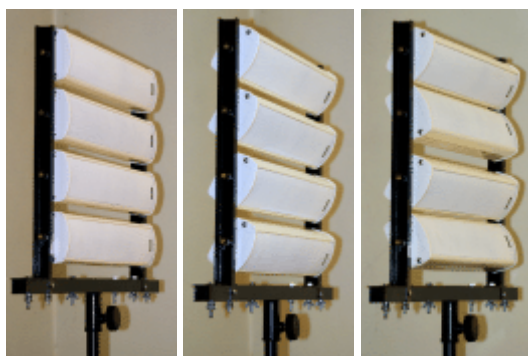
REPRODUKTOROVÁ STĚNA 4×DPT208

Jak jsme uvedli v [1] pořídila Katedra technických předmětů Pedagogické fakulty Univerzity Hradec Králové pro potřeby výuky v předmětu Auditoriologie učeben pro učitele osm reproduktorových sloupů DPT208 z rozvojového projektu FRVŠ. V rámci projektů specifického výzkumu SV PdF 2123/2011 a SV PdF 2131/2013 jsme ve spolupráci s akustickými laboratořemi FEL ZČU v Plzni, realizovali měření frekvenčních a směrových charakteristik reproduktorových stěn, sestavených z reproduktorových sloupů DPT208 a to v pěti variantách (obr.186):

- klasická reproduktorová stěna,
- stěna s vnucenou fázovou chybou - zářiče pootočené o 15° , 30° a 45° ,
- uspořádání do "W", s dvojicemi zářičů pootočenými k sobě o $\pm 30^\circ$.

Měření byla provedena v bezodrazové komoře akustických laboratoří FEL ZČU v Plzni. Použit byl analyzátor Brüel & Kjaer BK PULSE typ 3560C.

Výchozí hodnoty pro měření reproduktorové stěny jsou uvedeny v tabulce 15.



a) b) c)

Obr.186 Varianty reproduktorových stěn
a) klasická, b) s vnucenou fázovou chybou,
c) uspořádání do "W"

Tab.15 Výchozí hodnoty reproduktorové stěny a podmínky měření

parametr	zn.	hodnota
celkový počet reproduktorů	N	32
uspořádání	m × n	8 × 4
jmenovitý průměr reproduktoru	d	2,5"
aktivní průměr membrány	d _a	55 mm
báze sloupu DPT208	b	72,5 mm
báze stěny (rozestup sloupů)	b'	150 mm
aktivní vyzařovací plocha	S _a	760 cm ²
měřicí vzdálenost	L _m	2,26 m
příkon 1 sloupu při měření	P	1 VA
napájecí napětí	U _{RMS}	4 V
teplota v komoře	T	21,3 °C
relativní vlhkost vzduchu	φ	54 %

Směrové charakteristiky

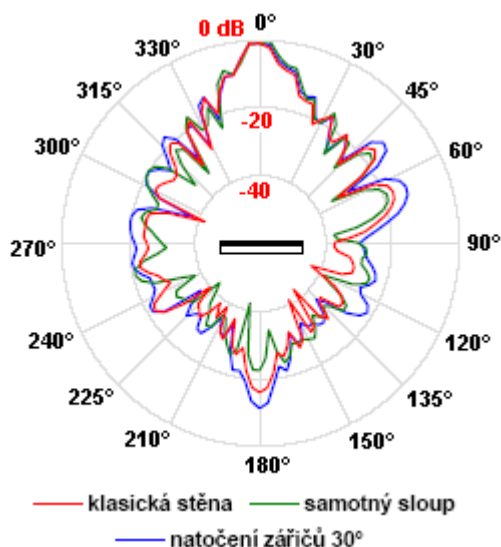
Směrové (vyzařovací) charakteristiky reproduktorových stěn byly měřeny v horizontální a vertikální rovině, přičemž výchozím směrem 0° je vždy geometrická osa průmětu aktivní čelní plochy reproduktorové stěny. Stejně jako u měření samotných reproduktorových sloupů byly vzhledem k uspořádání zářičů a mechanické konstrukci také reproduktorové stěny instalovány na točně mírně asymetricky (obr.187), aby skutečný střed skládaného zářiče byl v ose točny.

Směrové charakteristiky v rovině procházející směrem 0° a rovnoběžné s osou reproduktorových sloupů podle předpokladů odpovídá směrové charakteristice samotného sloupu. Porovnání

změřených směrových charakteristik pro frekvenci 4 kHz ukazuje, že vyzařování v hlavním směru je u všech zářičů prakticky identické. Drobné rozdíly jsou u bočních laloků a největší rozdíl zaznamenáváme, u zadního laloku, kde vlivem větší vyzařovací plochy je nárůst až 20 dB (obr.188).

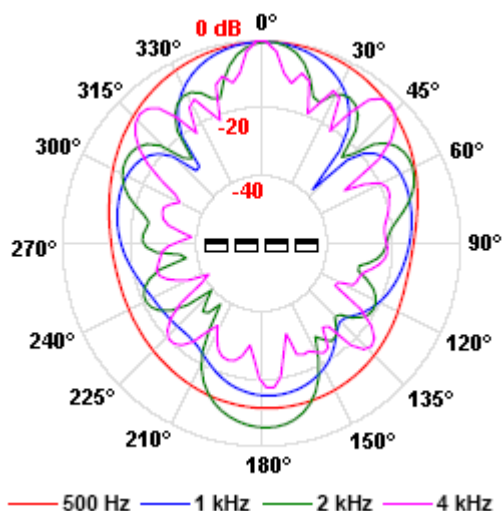


Obr.187 Reproduktorová stěna 4×DPT208 instalovaná na točně bezodrazové komory

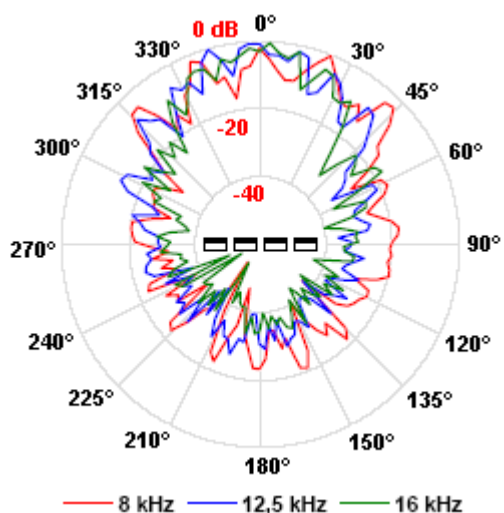


Obr.188 Porovnání směrových charakteristik reproduktorový sloup a reproduktorové stěny

Směrové charakteristiky v rovině kolmé na osy sloupů a procházející směrem 0° byly měřeny v oktávové řadě 0,5; 1; 2; 4; 8 a 16 kHz s doplňujícím měřením pro frekvenci 12,5 kHz. Měření v oktávové řadě je dostačující pro orientaci v dosažitelné směrovosti. Všechny změřené charakteristiky jsou normovány na úroveň 0 dB.



Obr.189 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4x DPT208

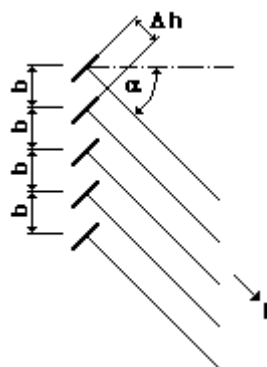


Obr.190 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4x DPT208

Vyzařovací diagramy reproduktorové stěny, složené ze čtyř reproduktorových sloupů DPT208, (obr.189, 190) korespondují v předním poloprosoru s charakteristikami vypočítanými pro ideální zářič tvaru obdélníkové, pístově kmitající desky. Z naměřených hodnot vyplývá, že stěna začíná směřovat už pro frekvence nad 500 Hz a její vyzařovací úhel je přibližně $\pm 30^\circ$. S naklápěním stěny se potom natáčí i vyzařovací diagram.

Sestavy reproduktorových stěn se vzájemně natočenými zářiči (obr.186b) se sice v praxi občas objeví, nicméně pro jejich použití chybí teoretický základ. Autoři publikací z oboru teoretické elektroakustiky se tomuto tématu důsledně vyhýbají. První komplikací je už skutečnost, že se u zářičů tohoto typu obtížně stanovuje akustická osa (pokud ji lze vůbec učít). Zářiče totiž neleží v jedné přímce (jedné rovině), ale jsou vůči sobě (z pohledu své vlastní akustické osy) posunuty o vzdálenost Δh (obr.191), kde

$$\Delta h = b \cdot \sin \alpha \quad (81)$$



Obr.191 Sestava vzájemně natočených zářičů

Budeme-li při značném (a v praxi nepoužitelném) zjednodušení předpokládat, že jednotlivé zářiče vyzařují rovinnou vlnu, potom budou signály sousedních zářičů fázově posunuty o úhel $\varphi = 180^\circ$ ($\varphi = \pi$) v okamžiku, kdy

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2} \quad (82a)$$

$$\Delta h = \frac{c_0}{2f} \quad (82b)$$

Uvedené rovnice lze zobecnit pro liché násobky $\lambda/2$ do tvaru

$$\Delta h = (2i - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (83a)$$

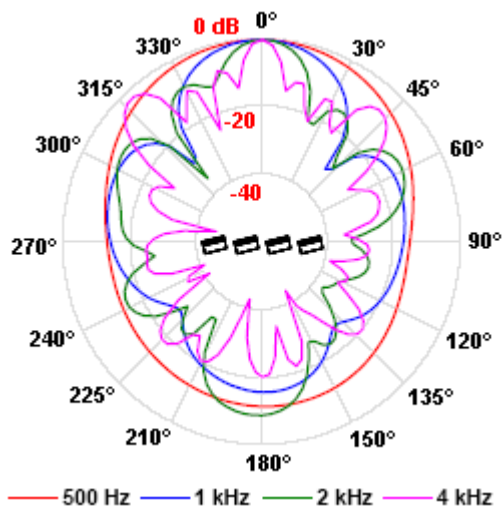
$$\Delta h = (2i - 1) \cdot \frac{c_0}{2f} \quad (83b)$$

kde $i = 1, 2, 3 \dots$

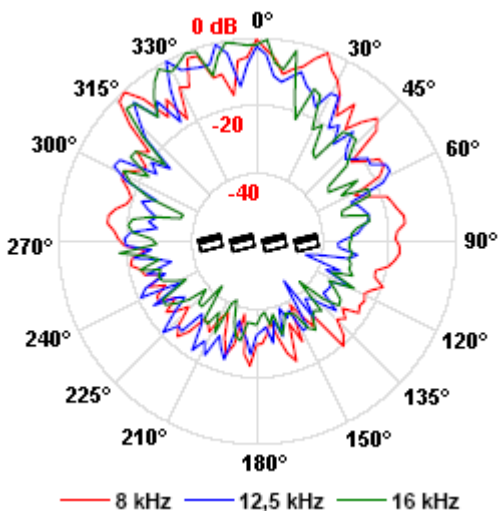
Signály sousedních zářičů tedy budou v protifázi pro frekvence (po dosazení (81) do (83b))

$$f_i = (2i - 1) \cdot \frac{c_0}{2b \cdot \sin \alpha} \quad (84)$$

V reálu je celá problematika mnohem složitější. Ve spolupráci s odborníky z FEL ZČU připravujeme zpracování matematických modelů pro tyto zářiče. Na obr.192-199 jsou směrové charakteristiky skládaných zářičů pro natočení reproduktorových sloupů 15°, 30°, 45° a "W".

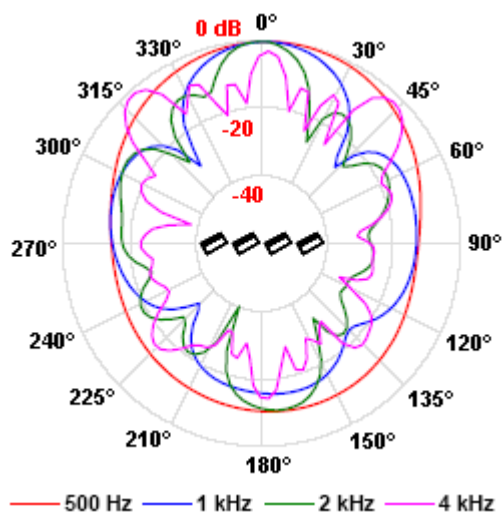


Obr.192 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 15°

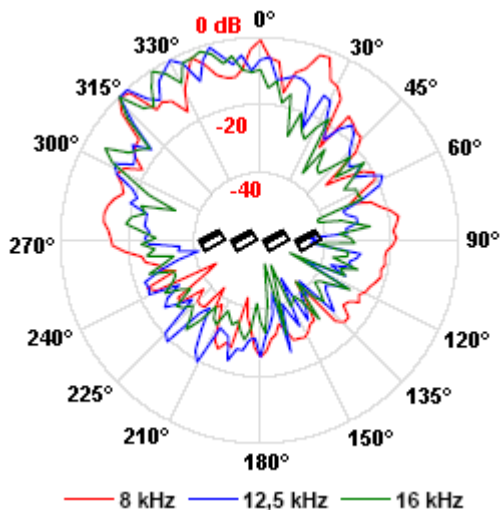


Obr.193 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 15°

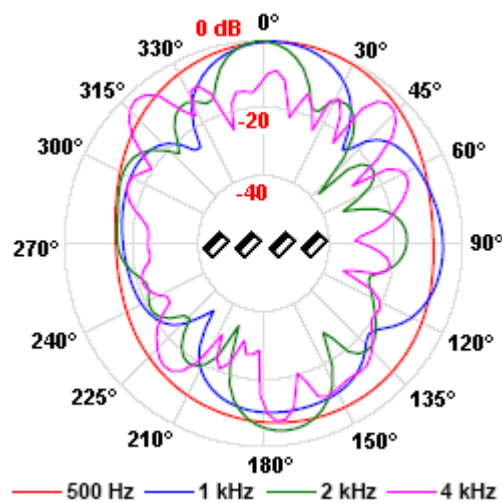
Ze změřených charakteristik vyplývá, že natočení samotných zářičů nepřináší pro nižší a střední frekvence prakticky žádný efekt. K natočení celé charakteristiky (resp. rozšíření u "W") dochází v daném případě pro frekvence 8 kHz a vyšší. Konstrukční jednoduchost takto řešených je jejich jedinou výhodou. Z akustického hlediska nemají praktický význam jak vyplývá ze srovnání směrových charakteristik (obr.200-206).



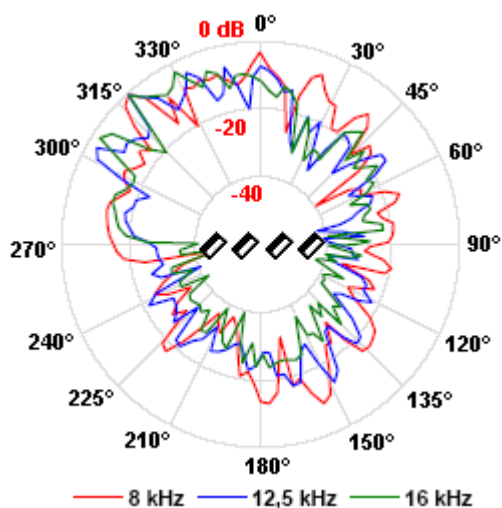
Obr.194 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 30°



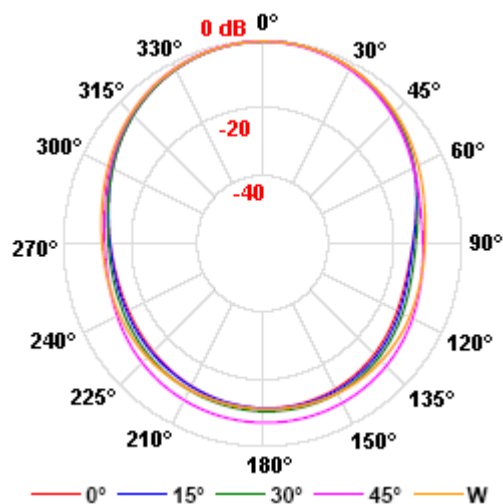
Obr.195 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 30°



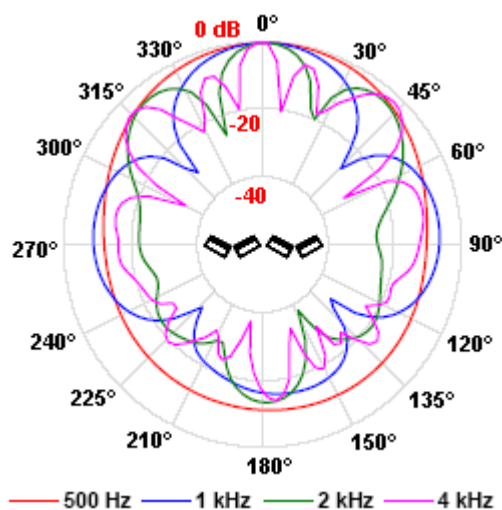
Obr.196 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 45°



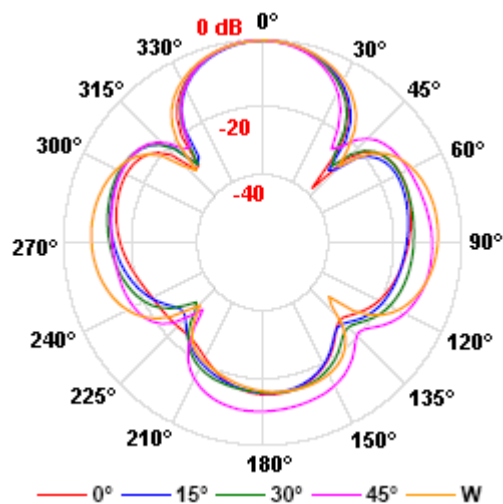
Obr.197 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 45°



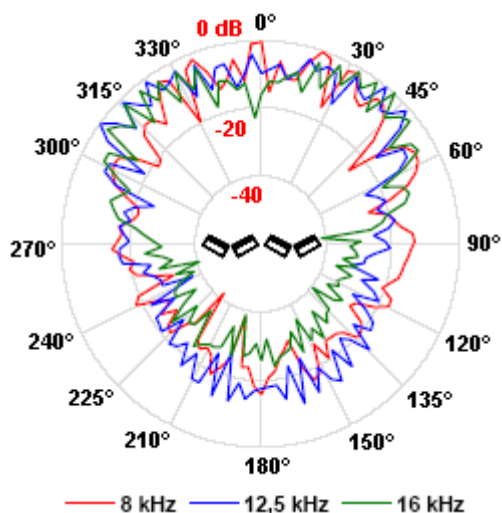
Obr.200 Porovnání směrových charakteristik reproduktorových stěn 4×DPT208 (f = 500 Hz)



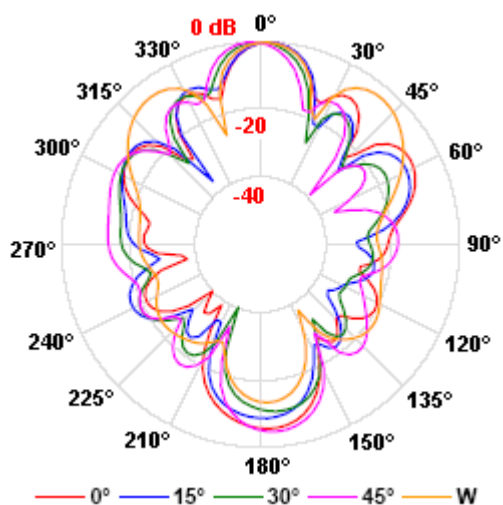
Obr.198 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4×DPT208 uspořádání "W", natočení sloupů ±30°



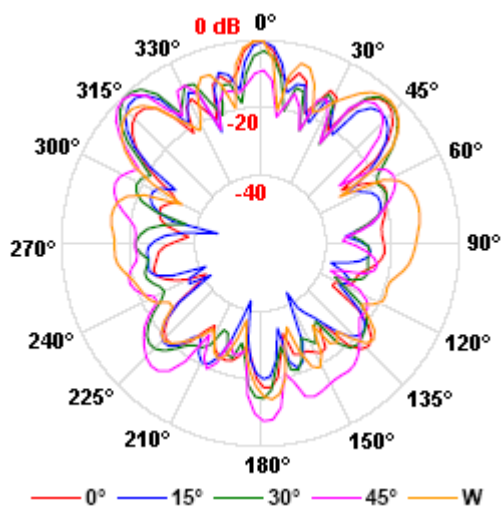
Obr.201 Porovnání směrových charakteristik reproduktorových stěn 4×DPT208 (f = 1 kHz)



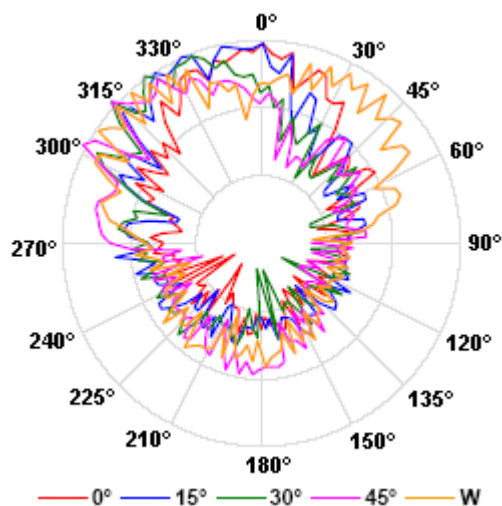
Obr.199 Směrové charakteristiky reproduktorové stěny 4×DPT208 uspořádání "W", natočení sloupů ±30°



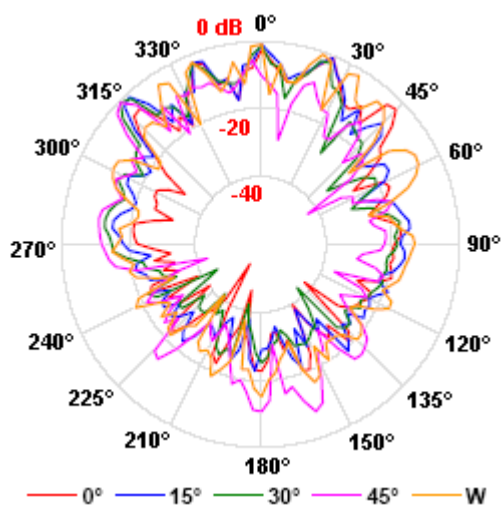
Obr.202 Porovnání směrových charakteristik reproduktorových stěn 4×DPT208 (f = 2 kHz)



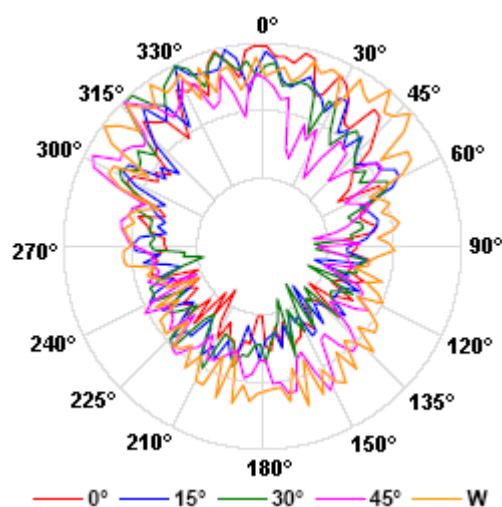
Obr.203 Porovnání směrových charakteristik reproduktorových stěn 4×DPT208 ($f = 4$ kHz)



Obr.206 Porovnání směrových charakteristik reproduktorových stěn 4×DPT208 ($f = 16$ kHz)



Obr.204 Porovnání směrových charakteristik reproduktorových stěn 4×DPT208 ($f = 8$ kHz)

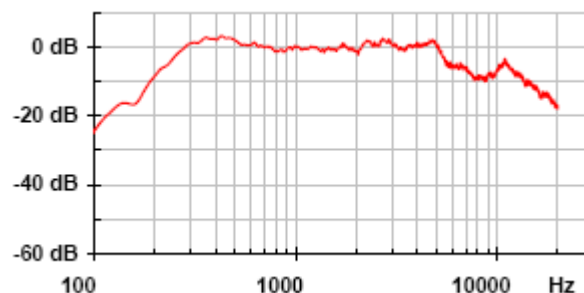


Obr.205 Porovnání směrových charakteristik reproduktorových stěn 4×DPT208 ($f = 12,5$ kHz)

Frekvenční charakteristiky

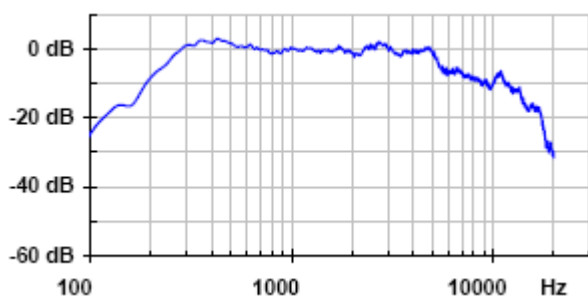
Frekvenční charakteristiky byly měřeny bílým šumem pomocí FFT (Fast Fourier Transformation). Měřeno 3 200 spektrálních čar v pásmu 6,25 Hz až 20 kHz, $\Delta f = 6,25$ Hz [19].

Frekvenční charakteristika klasické reproduktorové stěny (obr.207) je téměř identická s frekvenční charakteristikou samotného sloupu (obr. 152 [1]). Vzhledem k relativně velkému počtu zářičů je průběh vyrovnanější, zejména v pásmu 300 Hz až 5 kHz. Také na vysokých frekvencích (nad 5 kHz) vykazuje průběh menší zvlnění a nižší útlum.

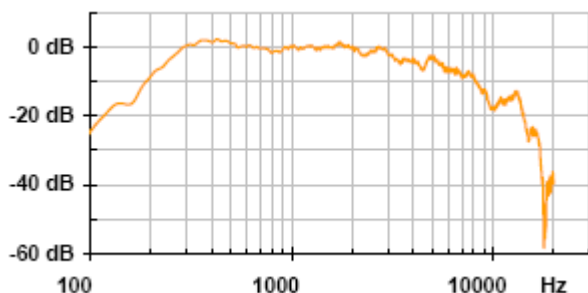


Obr.207 Frekvenční charakteristika reproduktorové stěny 4×DPT208 klasické uspořádání, natočení sloupů 0°

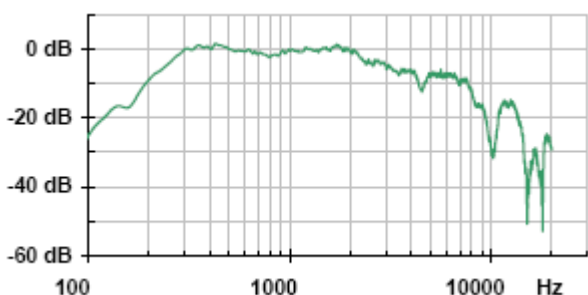
Pro sestavy se vzájemně pootočenými sloupy je možné očekávat (jak naznačuje rovnice (84)), že se na frekvenční charakteristice objeví nežádoucí zvlnění nebo útlumová minima. Na obr.208-211 jsou frekvenční charakteristiky reproduktorových stěn s natočením sloupů 15°, 30°, 45° a uspořádáním do "W".



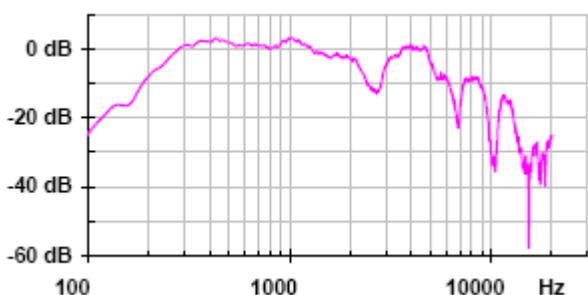
Obr.208 Frekvenční charakteristika reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 15°



Obr.209 Frekvenční charakteristika reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 30°



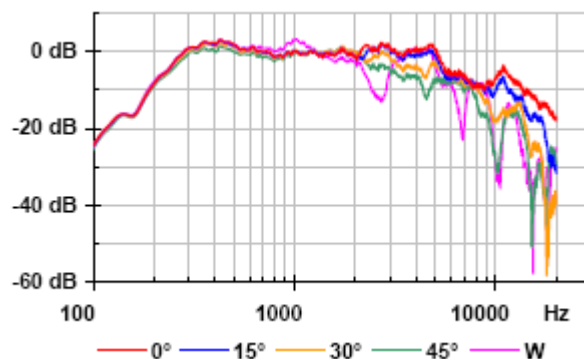
Obr.210 Frekvenční charakteristika reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů 45°



Obr.211 Frekvenční charakteristika reproduktorové stěny 4×DPT208 natočení sloupů ±30°, uspořádání "W"

Naměřené frekvenční charakteristiky potvrzují předpoklad, že s natočením jednotlivých reproduktorových sloupů dochází jednak útlumu na

vyšších frekvencích (například pro úhel natočení 45° klesá frekvenční charakteristika již od 1 kHz), jednak dochází k jejímu zvlnění, kdy se největší zvlnění projevilo u uspořádání do "W" (obr.211). Pro všechny sestavy s pootočenými sloupky je potom charakteristické minimum na frekvenci 10,35 kHz.



Obr.212 Porovnání frekvenčních charakteristik

Charakteristická citlivost

Charakteristická citlivost byla měřena v souladu s ČSN IEC 268-5 a ČSN EN 60268-5 růžovým šumem filtrovaným pro pásmo 150 Hz až 20 kHz, měření v třetinooktávových pásmech, při buzení 4 VA (budicí napětí $U_{RMS} = 4\text{ V}$) ve vzdálenosti 2,26 m (přibližně trojnásobek rozměru reproduktorové stěny) [19], [20].

Charakteristická citlivost určená analyzátozem v měřicí vzdálenosti 2,26 m je 98,2 dB při příkonu 4 VA. Ekvivalentní charakteristická citlivost ve vzdálenosti 1 m, přepočítaná z průběhu akustického tlaku v akustické ose stěny v pásmu 400 Hz až 4 kHz je 99,4 dB/1 VA/1 m.

PRAKTICKÁ APLIKACE VÝSLEDKŮ DO PROCESU VZDĚLÁVÁNÍ

Soubor naměřených hodnot, spolu s výpočty prediktivních charakteristik klasické reproduktorové stěny představuje rozsáhlý materiál, který lze použít nejen pro popis technických parametrů skládaných zářičů z reproduktorových sloupů DPT 208 a pro optimalizaci jejich aplikací v nejrůznějších akustických prostorech, ale i jako srovnávací materiál při teoretickém řešení skládaných zářičů v nestandardních variantách. Samozřejmě je využití těchto dat jako konkrétních příkladů při výuce. Uvedené frekvenční a směrové charakteristiky budou využívány zejména v předmetu Auditorologie učeben pro učitele, jehož cí-

lem je představit auditoriologii studentům nejen jako vědní obor, ale především ukázat nutnost jejího těsného propojení s oborovými didaktikami, včetně možné aplikace komunikačních modelů při řešení přenosových kanálů učeben [21].

V rámci dne otevřených dveří si studenti sami prakticky vyzkoušeli a ověřili instalaci mobilního ozvučení koridoru v přízemí katedry technických předmětů (obr.213).



Obr.213 Koridor KTP, ozvučovací systém se stěnami 2×DPT208, řídicí pracoviště

Pro ozvučení 42,5 m dlouhé chodby s profilem $2,50 \times 4,05$ m v přízemí historické budovy Pedagogické fakulty byly použity dvě malé reproduktorové stěny formátu 2×8 , které tvořily dvojice reproduktorových sloupů DPT208 na společném závěsu. Zářič byl umístěn ve zlomu koridoru. Pro koncové body ve vzdálenostech 19,5 a 23 m byly výsledky subjektivního hodnocení poslechových testů velmi dobré a nebyl prakticky zaznamenán výrazný rozdíl hodnocení mezi koncem chodby a ve vzdálenosti 2 m od zářiče. Pro vyrovnání frekvenční charakteristiky byl alternativně použit procesor Behringer DEQ 2496 a terciový equalizér FBQ 3102. Frekvenční rozsah byl omezen

horní a dolní propustí na 150 Hz až 12,5 kHz. Nerovnoměrnost hladiny akustického tlaku nepřesáhla 6 dB na délce 19,5 m v části s přímou viditelností. Ve druhé části koridoru (délka 23 m), kde částečně stíní 50cm rámy dveří a chodba se lomí, byla nerovnoměrnost hladiny akustického tlaku do 10 dB. Měřilo se impulzním signálem a růžovým šumem. Zdrojem měřících signálů byl nově pořízený referenční zdroj NTi TalkBox.

ZÁVĚR

Z podrobné analýzy výsledků měření, porovnání naměřených hodnot s teoretickými předpoklady a z výsledků dosavadních provozních zkoušek můžeme konstatovat, že reproduktorové stěny, složené z reproduktorových sloupů DPT208 lze považovat za velmi dobré a relativně levné akustické zářiče, s dobrými přenosovými vlastnostmi i směrovými charakteristikami. Výsledky stávajícího výzkumu rovněž ukázaly, že sestavy se vzájemně natočenými zářiči nepřinášejí prakticky žádné výhody a že tímto způsobem v zásadě není možné natáčet vyzářovací diagram.



Obr.214 Laboratorní verze velké reproduktorové stěny 4×16 ($8 \times$ DPT208)

V další fázi výzkumu se zaměříme na dlouhé reproduktorové sloupy, velké reproduktorové stěny a jejich aplikaci pro velké posluchárny (obr.214). Předpokládáme, že vzhledem ke stovebnicové-

mu systému sloupů DPT208 by nemusel být až tak velký výrobní problém zhotovit sloupy v modulu 16, 24 a 32 reproduktorů, z nichž by bylo možné skládat výkonné směrové zářiče s minimálními zástavbovými nároky.

Článek byl vytvořen s podporou projektů specifického výzkumu SV PdF 2123/2011 *Predikce směrových charakteristik skládaných akustických zářičů a možnosti jejich využití pro ozvučovací systémy učeben a SV PdF 2131/2013 Míra závislosti indexu srozumitelnosti v přednáškových sálech na vyzářovacím diagramu akustických zářičů a způsobu řešení sálových korekcí.*

Autoři děkují Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za odbornou a technickou pomoc při měření v akustických laboratořích FEL ZČU.

Použité zdroje

- [1] DRTINA, R. - LOKVENC, J. et al. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 8. - Směrové charakteristiky reproduktorového sloupu DPT208.* Media4u Magazine. 1/2012. s.154-164. ISSN 1214-9187.
- [2] DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 7. - Linkové transformátory.* Media4u Magazine. 3/2009. s.38-49. ISSN 1214-9187.
- [3] CHROMÝ, J. *Role technických výukových prostředků v elektronickém marketingu vysokých škol.* Praha. Verbum. 2012. ISBN 978-80-905177-5-2.
- [4] DRTINA, R. *Možnosti a omezení elektronické podpory kvality vzdělávání.* Praha. Extrasystem. 2012. ISBN 978-80-87570-01-2.
- [5] SMETANA, C. *Praktická elektroakustika.* Praha - Bratislava. SNTL/ALFA. 1981.
- [6] ČSN 73 0527 *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely.* Praha. ČNI. 2005.
- [7] ČSN 73 0525 *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady.* Praha. ČNI. 1998.
- [8] DRTINA, R. - CHRZOVÁ, M. - MANĚNA, V. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria, Část 3. - Akustická příprava prostoru.* Media4u Magazine. 1/2007. s.7-12. ISSN 1214-9187.
- [9] FEISTEL, S. - THOMPSON, A. - AHNERT, W. *Methods and Limitations of Line Source Simulation.* Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 57, No. 6, 2009. ISSN 0004-7554.
- [10] STENZEL, H. *Leitfaden zur Berechnung von Schallvorgängen.* Berlin. Springer Verlag. 1939.
- [11] DREJZEN, I. G. *Elektroakustika i zvukovoje veščanie.* Moskva. Gosudarstvennoe izdatelstvo po voprosam svjazi i radio. 1961.
- [12] SVOBODA, M. - ŠTEFAN, M. *Reproduktory a reproduktorové soustavy.* Praha. SNTL. 1983.
- [13] MEYER SOUND. *SB-1 Parabolic Sound Beam. Operating Instructions.* Meyer Sound Laboratories, Inc. 1997.
- [14] MEYER SOUND. *SB-2 Parabolic Wide-Range Sound Beam.* Meyer Sound Laboratories, Inc. 2002. SB-2 - 04.108.014.01A.
- [15] DRTINA, R. - MANĚNA, V. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 6. - Reproduktorové sloupy.* Media4u Magazine. 1/2008. s.9-19. ISSN 1214-9187.
- [16] CHROMÝ, J. *Materiální didaktické prostředky v informační společnosti.* Praha. Verbum. 2011. ISBN 978-80-904415-5-2.
- [17] MERHAUT, J. *Teoretické základy elektroakustiky.* Praha. Academia. 1985.
- [18] ŠKVOR, Z. *Akustika a elektroakustika.* Praha. Academia. 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [19] TUREČEK, O. *Měření parametrů reproduktorů.* In Setkání uživatelů PULSE. Praha. Spectris. 2005. s.97-101. ISBN 80-239-4909-8.
- [20] TUREČEK, O. *Měření zkreslení elektrodynamických reproduktorů.* In 5. setkání uživatelů PULSE. Praha. Spectris. 2007. s. 170-173. ISBN 978-80-237-9240-3.
- [21] CHROMÝ, J. - DRTINA, R. *Vybrané souvislosti výuky a přenosového modelu komunikace.* Media4u Magazine. 4/2010. s.89-92. ISSN 1214-9187.

Kontaktní adresy

doc. dr. René Drtina, Ph.D. e-mail: rene.drtina@uhk.cz
doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc. e-mail: jaroslav.lokvenc@uhk.cz

Katedra technických předmětů PdF UHK
Rokitsanského 62
500 03 Hradec Králové