

## Závěrečná zpráva projektu specifického výzkumu - zakázka č. 2123

### Název projektu: **Predikce směrových charakteristik skládaných akustických zářičů a možnosti jejich využití pro ozvučovací systémy učeben**

Odpovědný řešitel: PaedDr. René Drtina, Ph.D.  
Studenti magisterského studia na PdF UHK: Tomáš Provazník, Michal Švandrlík  
Další výzkumní pracovníci: doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc.  
Externí spolupráce: Ing. Jan Chromý, Ph.D.  
Celková částka přidělené dotace: 74 500 Kč

#### Východiska projektu

V posledních pěti letech roste počet výzkumů, zabývajících se kvalitou a efektivitou výuky, a výzkum v této oblasti se do jisté míry stal módním trendem. Prakticky bez výjimky byly ve výzkumech vždy hodnoceny materiály a postupy, které vytvořili autoři daného výzkumu. Ani v jednom případě nebyly objektivně popsány podmínky, za nichž experiment probíhal. Jestliže se chceme zabývat kvalitou a efektivitou vzdělávacího procesu, měli bychom vzít v úvahu požadavky ČSN EN ISO 9001 [2], kde z článků 6.3 - Infrastruktura a 6.4 - Pracovní prostředí a vyhl. MMR č.137/1998 Sb. [9] a MZ č.108/2001 Sb. [10] můžeme pro podmínky školního provozu odvodit, že pro kvalitní a efektivní výuku je nezbytné zajistit optimální pracovní prostředí. Projekt specifického výzkumu byl orientován právě na tento opomíjený přístup. Jeho smyslem je zintenzívnit malou interakci oborové didaktiky a architektury pro projektování výukových prostor nově budovaných školských zařízení a navrhnout technická a nedrahá řešení kvalitního ozvučení pro hromadné použití ve výukových prostorách školských zařízení již existujících, kde další stavební úpravy jsou většinou z různých důvodů nereálné.

#### Postup řešení projektu

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 učeben ukázaly ve většině případů nevyhovující parametry, srozumitelnost řeči se pohybuje na úrovni pod 90 %. Většina ozvučovacích systémů není v praxi podložena projektem a měřením, nevhodná bývá i volba komponent ozvučovacího systému (často jsou používány komponenty určené pro komerční účely) a jejich instalace.

Ozvučování učeben patří ke specifickým úkolům elektroakustiky. Z didaktického hlediska by měla být hlavním parametrem dokonalá srozumitelnost řeči a v dané časové expozici minimální sluchová únava. Současné světové trendy v ozvučování větších a málo tlumených auditorií představují digitálně řízené reproduktorové sloupce a clustery Line-array s DSP (Digital Signal Processing). Pro školy jsou z finančních důvodů obtížně dostupné. Cílem projektu bylo ověřit použitelnost finančně dostupných pasivních skládaných akustických zářičů pro ozvučení učeben a shodu teoretických předpokladů s reálnými výsledky měření. Reproduktorové sloupce jsou neprávem opomíjenými zářiči s příznivými vlastnostmi a z nich sestavené stěny s výraznou směrovostí se již prakticky nepoužívají.

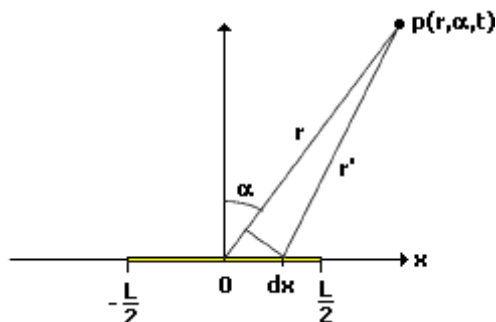
V průběhu řešení projektu byly v rámci spolupráce při řešení problematiky komunikačních modelů využity také podklady od ing. Chromého, které sumarizovaly stav ozvučení některých učeben a poslucháren pražských vysokých škol, přičemž výsledky korespondovaly s výstupy našich měření v posluchárnách PdF. Jako dílčí výstup spolupráce na projektu a obecnější východisko řešení byla zpracována monografie Materiální didaktické prostředky v informační společnosti, ISBN 978-80-904415-5-2, autor Jan Chromý, vydal Verbum Praha, 2011. Na vytvoření monografie byla s autorem uzavřena dohoda o provedení práce (použity prostředky IP VaV PdF). Autorem bylo písemně potvrzeno, že daná publikace bude uplatněna výhradně jako výsledek PdF UHK.

Ideální reproduktorový sloup je tvořen spojitou řadou bodových zářičů, kterou můžeme ztotožnit s lineárním zářičem konečné délky  $L$  (obr.1). Pro komplexní akustický tlak  $\tilde{p}$  mimo osu zářiče lze podle [8] odvodit rovnici

$$\tilde{p}(r, \alpha, t) = \frac{\tilde{A}_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} \int_{-L/2}^{L/2} e^{jkx \sin \alpha} dx \quad (1)$$

Analýza reálného lineárního zářiče [4] ukázala, že i systémy s konstantní akustickou rychlostí vykazují postranní vyzařovací laloky. Ty přitom byly příčinou odklonu od reproduktorových sloupů klasické konstrukce a skládaných reproduktorových systémů.

Vyzařování reálného reproduktorového sloupu konečné délky sestaveného z kruhových (ale i eliptických nebo oválných reproduktorů) můžeme popsat pomocí směrových funkcí.



Obr.1 Ideální reproduktorový sloup konečné délky

Pro kruhovou membránu přibližně platí

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

kde  $J_1$  je Besselova funkce prvního řádu  
a  $d$  je aktivní průměr membrány

Výsledná směrová funkce reproduktorového sloupu je potom daná součinem  $S_1 \cdot S_n$ .

Při těsné montáži reproduktorů můžeme, s jistým přiblížením, směrovou funkci zářiče vyjádřit stejně jako u obdélníkového zdroje s rozměry  $d \times a$ , kde  $a$  je tzv. aktivní délka sloupu, která se rovná délce řady reproduktorů [8].

$$S_2 = \frac{\sin \left( \frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha \right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha} \quad (4)$$

Pro řadu  $n$  zářičů ve vzdálenosti (s bází)  $b$  platí

$$S_n = \frac{\sin \left( \frac{\pi n b}{\lambda} \cdot \sin \alpha \right)}{n \sin \left( \frac{\pi b}{\lambda} \cdot \sin \alpha \right)} \quad (3)$$

Pro skládaný zářič typu reproduktorové stěny platí pro směrové funkce v příčném směru (kolmo k ose  $x$  v bodu 0) rovnice (2) a (3), kde za  $\alpha$ ,  $b$ ,  $n$ , dosadíme odklon  $\beta$ , bázi  $b'$  a počet zářičů  $m$  v příčném směru. Analogicky lze upravit i rovnici (4), zavedením aktivní šířky  $c$ .

$$S_3 = \frac{\sin \left( \frac{\pi c}{\lambda} \sin \beta \right)}{\frac{\pi c}{\lambda} \sin \beta} \quad (5)$$

Při určitém zjednodušení můžeme uvažovat, že  $a = n \times D$ , kde  $D$  je 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).

Pro ověření teoretických předpokladů byly změřeny frekvenční a směrové charakteristiky reproduktorových sloupů DPT208, pořízených z projektu FRVŠ a upravených podle [3]. Pro účely projektu byla ze čtyř sloupů sestavena reproduktorová stěna o rozměrech  $70 \times 70$  cm v uspořádání  $4 \times 8$  reproduktorů, s bází 75 mm a roztečí řad 150 mm. Měření jsme realizovali v bezodrazové komoře akustických laboratoří FEL ZČU v Plzni za použití analyzátoru Brüel & Kjaer 2260. Současně byl ověřen souběh charakteristik, změřených analyzátozem NTI XL2, který je využíván pro mobilní měření.

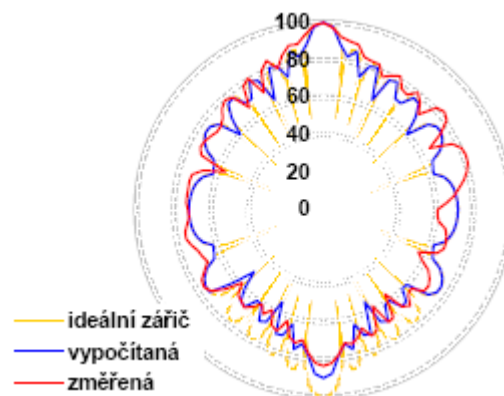
Provozní zkoušky byly z časových důvodů omezeny na orientační test dosažitelné srozumitelnosti, a to v aule PdF (učebna C5) a při ozvučení koridoru v přízemí budovy C. Použit byl zkrácený logatomický test, ochranu vůči zpětné vazbě a stabilitu systému zajišťoval procesor Sabine FBX 2410.

### Dosažené výsledky

Výsledky měření ukazují, že zvolené reproduktorové sloupy DPT 208 mají vyrovnanou frekvenční charakteristiku v pásmu 250 Hz až 12,5 kHz. Pokles v oblasti nad 5 kHz lze vyrovnat korekcemi přenosové charakteristiky v rámci tzv. sálových korekcí (obr.2). Ty jsou obvykle nutné pro vyrovnání úrovně sykavek v důsledku útlumu vysokých frekvencí šířením a zachování srozumitelnosti.



Obr.2 Frekvenční charakteristika DPT 208

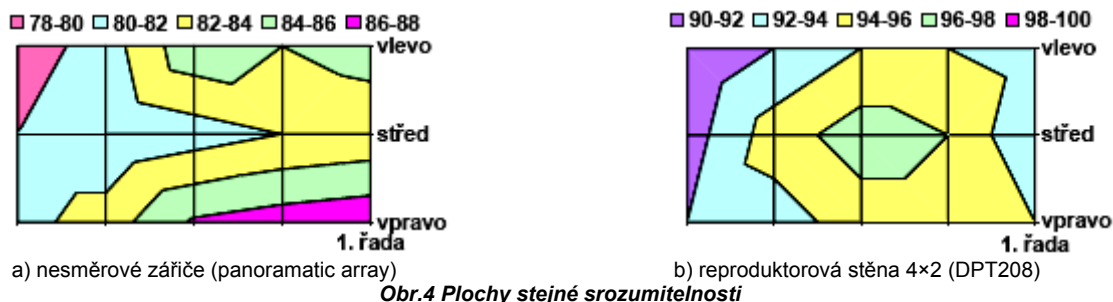


Obr.3 Směrová charakteristika  $4 \times$  DPT 208 (4 kHz)

Ze směrových charakteristik vyplývá velmi dobrá shoda mezi vypočítanými a naměřenými průběhy (obr.3). Malé zvlnění reálných charakteristik je způsobeno rozptylem na krycí mřížce. V porovnání s ideálním zářičem nemá reálná sestava výrazné nulové směry. Pro spojitý signál je jejich význam v praxi zanedbatelný. Potlačení vyzařování mimo akustickou osu v předním poloprostoru sloupu je cca 20 dB, potlačení vyzařování v zadním poloprostoru je až 40 dB. Měření rovněž potvrdila, že vzájemné natočení zářičů výrazně mění směrovou funkci a ruší směrové vyzařování. Pro maximální potlačení vyzařování mimo plochu auditoria se jako jedny z nejúčinnějších jeví čtvercové reproduktorové stěny, pro dlouhé učebny potom stěny obdélníkové s delší vertikální stranou. Přínos použití směrových zářičů ukazují změny ploch stejné srozumitelnosti na obr.4.

Dosažené výsledky ukazují, že skládané akustické zářiče na bázi pasivních reproduktorových sloupů jsou ekonomicky příznivou alternativou návrhu ozvučení učeben. Narozdíl od nesměrových soustav s malým dosa-

hem vytvářejí předpoklad vyšší dosažitelné srozumitelnosti v ploše auditoria, snížení hladiny rušivého pozadí v důsledku omezení vyzařování mimo akustickou osu zářiče a v neposlední řadě menší chybové audiovizuální úhly, podmíněné větším dosahem reproduktorových sloupů nebo skládaných zářičů.



Provozní zkoušky ukázaly, že malé reproduktorové sloupky DPT208 mohou být výhodně použity jak u interaktivních tabulí, tak i pro ozvučení velkých učeben. Za cenu standardních nesměrových reproduktorů 2 × 20 W pro interaktivní tabule (10 200 Kč) můžeme pro ozvučení učebny instalovat 4 sloupky DPT208 včetně zesilovače a malého mixážního pultu nebo sálových korekcí. Pro velké učebny lze za cenu jedné všesměrové soustavy BOSE 502 (23 000 Kč) instalovat reproduktorovou stěnu z 12 kusů DPT208 včetně výkonového zesilovače. Pro velké přednáškové sály bývá většinou výhodnější navrhnout skládaný zářič přímo pro daný prostor. Praxe ukazuje, že ani drahé řešení neznamena nutně dobré řešení. Nasazení skládaných zářičů sice vyžaduje dobrou projektovou přípravu (ta by však měla být samozřejmostí i pro jiné způsoby ozvučení), na druhé straně ale představuje nesporný přínos pro zvýšení kvality akustického přenosu v prostorech s nadlimitní dobou dozvuku a v prostorech bez akustických úprav.

#### Použité zdroje

- [1] AimWare - provides a visual interface to the complex math behind vertical array optimization. [on-line]. USA. Foothill Ranch. Renkus-Heinz. 2011. [cit. 2011-12-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.renkus-heinz.com/loudspeakers/linearrays/aimware/aimware.html>>
- [2] ČSN EN ISO 9001 *Systémy managementu kvality - Požadavky*. Praha. ČNI. 2010.
- [3] DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 7. - Linkové transformátory*. Media4u Magazine. 3/2009. s.38-49. ISSN 1214-9187.
- [4] FEISTEL, S. - THOMPSON, A. - AHNERT, W. *Methods and Limitations of Line Source Simulation*. Audio Engineering Society - Journal. 6/2009. s.379-402.
- [5] FEISTEL, S. - AHNERT, W. - HUGHES, C. - OLSON, B. *Simulating the Directivity Behavior of Loudspeakers with Crossover Filters*. Audio Engineering Society. New York. 2007. Convention paper 7254.
- [6] ICONYX - *Digitally Steerable Line Array Loudspeaker Systems. Operators guide*. Renkus-Heinz. 2010. RH651, Rev. D.
- [7] KIRKUP, S. - THOMPSON, A. *Simulation of the acoustic field produced by cavities using the Boundary Element - Rayleigh Integral Method (BERIM) and its application to a horn loudspeaker*. UK. High Wycombe. Martin Audio Ltd. 2004.
- [8] MERHAUT, J. *Teoretické základy elektroakustiky*. Praha. Academia. 1985.
- [9] *Vyhláška Ministerstva pro místní rozvoj, č.137/1998 Sb., ze dne 9.června 1998, o obecných technických požadavcích na výstavbu*.
- [10] *Vyhláška Ministerstva zdravotnictví, č.108/2001 Sb., ze dne 9.března 2001, kterou se stanoví hygienické požadavky na prostory a provoz škol, předškolních zařízení a některých školských zařízení*.

#### Výstupy projektu

V rámci řešení projektu byly zpracovány následující publikace, evidované NK ČR:

ID 43864882 - výsledek kategorie B

DRTINA, R. *Možnosti a omezení elektronické podpory kvality vzdělávání*. Praha. ExtraSystem. 2011.

ISBN 978-80-87570-01-2.

ID 43864789 - výsledek kategorie B

CHROMÝ, J. *Materiální didaktické prostředky v informační společnosti*. Praha. Verbum. 2011.

ISBN 978-80-904415-5-2.

Po zpracování výsledků měření v prosinci 2011 jsou připravovány k publikování články Směrové charakteristiky reproduktorového sloupu DPT208 a Směrové charakteristiky skládaných zářičů, autoři Drtina, Lokvenc, Provozník, Švandrlík.

#### Přehled realizovaných výdajů

- osobní náklady nebyly pro administrativní náročnost a nutné odvody nárokovány, DPP pro externího spolupracovníka byla fiancována z prostředků institucionální podpory vědy a výzkumu PdF.
- stipendia ve výši 2 × 4 000 Kč byla přiznána za pomoc při řešení úkolu, zejména montáž a demontáž skládaných zářičů, transport měřící techniky, technická pomoc při realizaci testů a jejich vyhodnocení studentům ID 20034 Provozník Tomáš, ID 19691 Švandrlík Michal.
- materiálové náklady představuje nákup měřící techniky a potřebného příslušenství:

přenosný zvukoměr-dataloger NTI XL2 s 2 GB paměťovou kartou pro real-time záznam, s třetinooktávovým a FFT spektrálním analyzátozem nahrazuje dosud používanou a transportně náročnou měřící sestavu NTB, VCO, zvukoměr, digitální osciloskop, plotr a analyzátor. V průběhu roku 2011 došlo k nárůstu ceny NTI XL2 z plánovaných 37 000 Kč na 39 000 Kč.

měřící mikrofon ECM 8000, levnější alternativa pro analyzátor NTI XL2, 1 400 Kč

eliminátor zpětné vazby Sabine FBX 2410, chrání reproduktory a koncové stupně před přetížením při měření ozvučovacího řetězu s připojenými mikrofony. V průběhu roku 2011 došlo k nárůstu ceny FBX 2410 z plánovaných 10 500 Kč na 11 400 Kč.

doplňkové příslušenství - mikrofonní držáky, protivětrné ochrany mikrofonů, adaptér pro mobilní provoz, propojovací kabely, 2 000 Kč.

- náklady na služby - pronájem akustických laboratoří a měřící techniky FEL ZČU Plzeň pro měření směrových a frekvenčních charakteristik. V rámci mezikatedrální spolupráce byly služby poskytnuty za finančně výhodných podmínek v nadstandardním rozsahu, 8 000 Kč.
- cestovné + doprava osob a reproduktorových sloupů s příslušenstvím služebním autem UHK na FEL ZČU Plzeň, 5 200 Kč.

Přidělená dotace ve výši 74 500 Kč byla se souhlasem oddělení vědy a výzkumu přerozdělena podle cenového vývoje v roce 2011, přes omezení výdajů na doplňkový materiál byl rozpočet přečerpán o 456 Kč. Podrobný přehled je uveden v následující tabulce.

**Tab.1 Přehled nákladů projektu 2123**

položka	množství	jednotková cena	náklady
stipendia	2	4 000	8 000
cestovné	1	100	100
doprava AUS	1	5 086	5 086
zvukoměr-analyzátor NTI XL2	1	38 927	38 927
eliminátor zpětné vazby FBX2410	1	11 422	11 422
měřící mikrofon ECM8000	1	1 420	1 420
pronájem laboratoří a techniky FEL ZČU Plzeň	1	8 000	8 000
adaptér pro mobilní provoz	1	850	850
objímka pro mikrofon	4	39	156
protivětrná ochrana mikrofonu	5	19	95
symetrický mikrofonní kabel	50	18	900
<b>celkové náklady</b>			<b>74 956</b>
<b>přečerpáno</b>			<b>456</b>

Pořízená technika bude spolu s vybavením pořízeným z rozvojových projektů FRVŠ využívána jak pro další výzkumné projekty, tak pro seminární a závěrečné práce studentů a pro výuku předmětů Auditoriologie učen a Prezentační technologie.

### Závěr

Cílem výzkumu bylo ověřit soulad teoretických předpokladů s reálnými vyzařovacími charakteristikami reproduktorových sloupů, z nich skládaných zářičů a ověření použitelnosti skládaných akustických zářičů pro návrh ozvučení poslucháren. Výzkumný záměr byl splněn, výsledky ukazují, že pro běžnou praxi postačují relativně jednoduché postupy výpočtu směrových charakteristik, prokazatelný je i přínos směrových zářičů pro dosažení vyšších hodnot srozumitelnosti v akusticky neupravených prostorech. Získané údaje z akustických měření představují rozsáhlý materiál, který bude využíván i v dalších projektech. Považujeme za nezbytné, aby se při projektování výukových prostor, ať už nově budovaných nebo rekonstruovaných, zohlednily požadavky oborových didaktik na řešení akustických úprav a kvalitního ozvučení výukových prostor.

Datum: 29. prosince 2011

PaedDr. René Drtina, Ph.D.

doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc.