

Závěrečná zpráva projektu specifického výzkumu na rok 2013 - zakázka č. 2131

Název projektu: Míra závislosti indexu srozumitelnosti v přednáškových sálech na vyzařovacím diagramu akustických zářičů a způsobu řešení sálových korekcí

Specifikace řešitelského týmu

Odpovědný řešitel: doc. dr. René Drtina, Ph.D.
Studenti magisterského studia na PdF UHK: Jakub Huček
Martin Prokop
Jakub Rulc
Martin Sýkora
Radek Weis
Další výzkumní pracovníci: doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc.
Externí spolupráce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.

Celková částka přidělené dotace 98 120 Kč (vč. navýšení rozpočtu projektu)

Postup při řešení projektu

Výzkumný záměr navazuje na projekty specifického výzkumu 2123/2011 a 2129/2012. Výchozí předpoklady, že se použití akustických zářičů s výrazným směrovým účinkem a optimální nastavení sálových korekcí projeví významným zvýšením indexu přenosu řeči a tím i vyšší dosažitelnou srozumitelností, se opírají jak o zákonitosti prostorové akustiky, teorii měničů a modely akustických polí, tak o konkrétní výsledky předcházejících výzkumů a zkušenosti z praxe. Analýza vyzařovacích diagramů skládaných akustických zářičů potvrdila velmi dobrou shodu vypočítaných a změřených charakteristik. Bylo tedy možné předpokládat, že aplikací směrových zářičů ve zkoumaných prostorech dosáhneme většího poloměru dozvuku a tím větší dozvukové vzdálenosti, snížení energie dozvukového pole a zvýšení srozumitelnosti. Z vertikálních a horizontálních vyzařovacích úhlů γ_v, γ_h změřených v bezdozvukové komoře byly stanoveny činitelé směrovosti jednotlivých sestav, podle rovnice (1) [1], [2], [3], kde $\gamma_1 > \gamma_2$. Činitelé směrovosti ve formantové oblasti dosahovaly hodnot $Q_Z = 16-24$.

$$Q_Z = \frac{510}{\gamma_2 \cdot \sqrt{1 - \cos \gamma_1}} \quad (1)$$

Za jinak konstantních podmínek se dozvuková vzdálenost v daném prostoru, ve srovnání se všesměrovým zářičem zvětší násobkem $\sqrt{Q_Z}$, tj. s použitými sestavami dosáhne tzv. volné pole do 4× až 5× větší vzdálenosti. Současně s tím se zvyšuje dosažitelná srozumitelnost řeči. Jak vyplývá z rovnice (2) [2], kde T je doba dozvuku daného prostoru, V jeho objem, l_{zp} vzdálenost zářič posluchač a n počet spolupůsobících zářičů, je ztráta srozumitelnosti souhlásek ζ , při jinak konstantních podmínkách, nepřímo úměrná činiteli směrovosti zářiče Q_Z .

$$\zeta = n \frac{200T^2 l_{zp}^2}{VQ_Z} \quad (2)$$

Pro měření podle ČSN EN 60268-16 Elektroakustická zařízení - Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči [4] byl v akustických laboratořích FEL ZČU v Plzni do analyzátoru NTi XL2 implementován modul STIPA 4. generace, spolu s rozšířením měřících rozsahů spektrálního analyzátoru a FFT. Současně byla provedena výměna opotřebovaného akumulátoru a kalibrace celého měřicího systému, včetně měřicího mikrofону a propojovacích kabelů. V rámci přípravy akustických měření byly změřeny frekvenční a vyzařovací charakteristiky referenčního akustického zářiče NTi TalkBox [5] (obr.7, příloha C), které výrobce neudává, a referenčních monitorů RS711-H v oblasti blízkého a volného pole.

Akustická měření probíhala 17. září 2013 v odpoledních a večerních hodinách v aule OSV, a 18.-19. září 2013 v kostelech sv. Voršily a Husova sboru v Chlumci nad Cidlinou. Pro základní orientaci v akustických vlastnostech prostoru byla ve všech prostorech změřena doba dozvuku podle ČSN EN ISO 3382-2 [6] a přenosová charakteristika stávajícího ozvučení. Ta byla měřena bílým šumem pomocí FFT s rozlišením až 8 192 spektrálních čar. Následně byly metodou STIPA zjišťovány indexy přenosu řeči v různých místech auditoria. Měření bylo provedeno vždy pro simulovaného řečníka bez použití ozvučení, samotný ozvučovací systém a kompletní přenosovou cestu zdroj-mikrofon-ozvučovací systém-posluchač. Na realizaci měření se kromě řešitelů úkolu a studentů podílel i tým z akustických laboratoří FEL ZČU v Plzni pod vedením Ing. Oldřicha Turečka, Ph.D. (Ing. Sýkora, Ing. Schlosser, Ing. Zuzjak) s další měřicí technikou. To nám umožnilo provádět souběžná měření bez nutnosti několikanásobných přestav, zkrátilo měřicí cykly a v daném čase jsme mohli provést až třikrát více měření.

Úvodní měření v aule OSV prokázala shodu s hodnotami naměřenými v letech 1992 a 2005. Prostorová akustika zůstala i po rekonstrukci beze změn, zachovala se i výrazná třepotavá ozvěna v první třetině auditoria a stejně jako v předchozích letech vykazuje nedostatečné parametry i relativně nestabilní ozvučovací systém. Průměrný index přenosu řeči (STIPA) přes stávající ozvučovací systém je 0,73 a přepočítaná průměrná srozumitelnost v aule (CIS) je 86 %, což koresponduje s hodnotami určenými pomocí logatomických testů. Další měření jsme provedli pro dvojici reproduktorových stěn formátu 4 × 8 (obr.1, příloha A) a pro dlouhý reproduktorový sloup s 24 zářiči (obr.2 a 3, příloha A). Jako moduly skládaných zářičů byly použity reproduktorové sloupky DPT208 [7], [8]. Frekvenční charakteristika byla v oblasti nad 5 kHz vyrovnána zvukovým procesorem Sabine NAV8800. S hodnotami (STIPA) od 0,61 do 0,80 a průměrnou srozumitelností (CIS) 86 % byly naměřené hodnoty srozumitelnosti, v rámci standardní chyby, prakticky totožné. Měření nepotvrdilo výpočtem stanovené předpoklady, přestože hodnocení poslechovým testem ukázalo diametrálně odlišné zvukové podání. Prostory kostelů jsme využili jako simulační prostory akusticky neupravených a členitých poslucháren (obr.4, obr. 5, příloha B). Použili jsme malé reproduktorové stěny formátu 2 × 16 (obr.6, příloha C). Výsledky měření prokázaly jistý vliv směrovosti zářičů i úpravy přenosové charakteristiky (tab.1). Přesto jsou naměřené hodnoty významně odlišné od vypočtených předpokladů.

Tab.1 Dílčí výsledky akustických měření (HS)

| použitý zářič, sálové korekce | rozmezí hodnot (STIPA) | průměrná srozumitelnost (CIS) |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| všesměrový, bez korekcí | 0,45-0,58 | 68 % |
| skládaný 2 × 16, vyrovnaný průběh | 0,52-0,57 | 73 % |
| skládaný 2 × 16, řečový filtr | 0,53-0,59 | 74 % |

Orientační poslechové a logatomické testy prokázaly, v případě skládaného zářiče a při použití řečového filtru, zdvih srozumitelnosti na 85 %. Interpretace výsledků měření je značně problematická. Pomineme-li skutečnost, že STIPA je validována pouze pro spektrum mužské řeči, naměřené hodnoty vytvářejí předpoklad pro tvrzení, že normovaná metoda je necitlivá na frekvenční i vyzářovací charakteristiky. Původní záměr projektu tedy bylo nutné rozšířit o další oblast - analýzu citlivosti metody STIPA na šířku přenosového kanálu. Ta měla ukázat, jestli existuje souběh mezi reálně naměřenými hodnotami a tzv. χ charakteristikami (obr.8, příloha D), které s rovnicí (3) udávají korekci pro ztrátu srozumitelnosti v procentech, v závislosti na omezení přenášeného pásma.

$$\zeta_{\text{cor}} = 50 - \chi_v \chi_h (50 - \zeta) \quad (3)$$

Analyzováno bylo 88 signálových vzorků s různým omezením přenosového pásma. Omezení formou analogového filtru, například pásmová propust 500 Hz až 2,5 kHz (obr.9, příloha D) a 700 Hz až 1,2 kHz (obr.10, příloha D), představuje potlačení formantové oblasti 4 kHz o 10/20 dB a snížení srozumitelnosti, podle rovnice (3), o $\zeta_{\text{cor}} = 9,6/23,8$ %. Vyhodnocení metodou STIPA však udává index přenosu řeči 0,97/0,91 a srozumitelnost (CIS) 99/96 %, což by pro praktické aplikace znamenalo, že standardní telefonní přenos zaručuje excellentní srozumitelnost řeči. S využitím extrémního útlumu programovatelných digitálních filtrů byla realizována např. přenosová pásma 400 Hz až 2,5 kHz (obr.11, příloha D) a 630 Hz až 1,6 kHz (obr.12, příloha D) s útlumem 60 dB v rozsahu $1/3$ oktávy. Zjištěný index přenosu řeči byl 0,68/0,51 a srozumitelnost (CIS) 83/71 %. V případě nižšího útlumu, 30 dB v rozsahu $1/3$ oktávy, byl pro shora omezené pásmo na 1,6 kHz (obr.13, příloha D) zjištěn index přenosu řeči 0,89 a srozumitelnost (CIS) 95 %.

Výstupy dosavadních analýz naznačují, že měření indexu přenosu řeči (přestože se jedná o normou stanovenou objektivní metodu) nelze ztotožnit s logatomickými testy pro hodnocení přenosových vlastností výukových prostorů. Zejména v oblasti jazykových učeben potom můžeme předpokládat fatální dopad akustiky učebny a vlastností přenosového kanálu na kvalitu výuky. Na provedené analýzy navazuje zkoumání vlivu doby dozvuku a úrovně dozvukového signálu na výsledky indikované indexem přenosu řeči a přepočítanou srozumitelností. Na realizaci dalšího výzkumu s námi i nadále spolupracují kolegové z akustických laboratoří FEL ZČU v Plzni, zejména se podílejí na provádění spektrálních analýz a přípravě matematických modelů.

Podle našeho názoru bude nezbytné výzkum rozšířit o detailní analýzu měřicího a snímaného signálu ve srovnání s výsledkem validních logatomických testů, s cílem verifikovat měřené hodnoty s výsledky logatomických testů nebo navrhnout úpravy měřicího systému tak, aby korelace výsledků signálového měření a logatomických testů byla co největší, v ideálním případě aby se korelační koeficient $\rho_{\text{CIS, LOG}} \rightarrow 1$.

Pro přiblížení se směrovosti lidského sluchu a měření v blízkém poli (zejména pro účely e-learningu) byl z navýšených finančních prostředků pořízen vlnový snímač s potřebným příslušenstvím. Dalším záměrem bylo využít simulace binaurálního slyšení s použitím dvou gradientních snímačů 2. řádu, jejichž výsledný činitel směrovosti by byl srovnatelný s činitelem směrovosti normálního sluchu, výstupní signál by respektoval možné fázové posuvy dopadajících vln a jejich použití by bylo univerzálnější než tzv. umělá hlava. Abychom mohli

bez čekání na další výzkumné projekty v akustických měřeních souvisle pokračovat a využít tak volných kapacit učeben ve zkušebním období, chtěli jsme doplnění měřicí techniky financovat, nad rámec rozpočtu projektu, z volných prostředků VaV katedry technických předmětů. Protože tento záměr nebyl schválen, budeme pokračovat v signálových analýzách a detailním ověřování normovaného postupu s pomocí matematických modelů. Na základě dohody s kolegy z akustických laboratoří FEL ZČU v Plzni a jejich zájmu o danou problematiku uvažujeme o dalších ověřovacích akustických měřeních v posluchárnách UHK, jejichž náklady by prozatím zálohově převzaly akustické laboratoře FEL ZČU v Plzni, případně by se pro ověřovací akustická měření využilo některých komerčních projektů.

Průběžně budou zpracovávány výsledky měření a analýz a následně publikovány v odborných časopisech a na mezinárodních konferencích. Verifikované závěry budou využity v připravované monografii. V případě, že se potvrdí nesoulad mezi měřeními zjištěnými hodnotami STIPA/CIS a logatomické poznatelnosti bude nezbytné tuto problematiku konzultovat s ÚNMZ a zpracovatelem příslušné normy. I přes to, že dosažené výsledky nejsou jednoznačně pozitivní, považujeme zjištěné skutečnosti za významné. Vzájemná součinnost prostorové akustiky a přenosových systémů představuje oblast mnoha proměnných, jejichž vazby dodnes nejsou zcela popsány a v řadě případů je jejich analytický popis nemožný. Naším cílem tak zůstává najít takovou metodiku posuzování přenosových vlastností prostorů pro výuku, jejíž výsledky, získané relativně jednoduchým měřením, budou rovnocenné logatomickým testům a z hlediska didaktiky ji bude možné využívat jako kvalitativní hodnotící kritérium při určování vstupních podmínek pedagogických výzkumů.

Použité zdroje

- [1] MERHAUT, J. *Příručka elektroakustiky*. Praha. SNTL. 1964.
- [2] SMETANA, C. *Praktická elektroakustika*. Praha - Bratislava. SNTL/ALFA. 1981.
- [3] DREJZEN, I. G. *Elektroakustika i zvukovoje veščanije*. Moskva. Gos. izdat. literatury po voprosam svjazi i radio. 1961.
- [4] ČSN EN 60268-16 *Elektroakustická zařízení - Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči*. Praha. ČNI. 2012.
- [5] LOKVENC, J. et al. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 10. - Normativní a technické podmínky měření indexu srozumitelnosti STIPA*. Media4u Magazine. 2/2013. s.64-72. ISSN 1214-9187.
- [6] ČSN EN ISO 3382-2 *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha. ČNI. 2009.
- [7] DRTINA, R. et al. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 8. - Směrové charakteristiky reproduktorového sloupu DPT208*. Media4u Magazine. 1/2012. s.154-164. ISSN 1214-9187.
- [8] DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 9. - Směrové charakteristiky skládaných zářičů z DPT208*. Media4u Magazine. 2/2013. s.50-63. ISSN 1214-9187.

Kontrolovatelné výsledky řešení

Níže uvedené publikační výstupy byly zadány do OBD s vazbou na RIV - J_{rec} Článek v odborném periodiku:
ID:43868046 DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 9. - Směrové charakteristiky skládaných zářičů z DPT208*. Media4u Magazine. 2/2013. s.50-63. ISSN 1214-9187.
ID:43868047 LOKVENC, J. - HUČEK, J. - PROKOP, M. - RULC, J. - SÝKORA, M. - WEIS, R. *Ozvučovací systémy pro velká auditoria. Část 10. - Normativní a technické podmínky měření indexu srozumitelnosti STIPA*. Media4u Magazine. 2/2013. s.64-72. ISSN 1214-9187.

Přehled realizovaných výdajů

- a) osobní náklady nebyly pro administrativní náročnost a nutné odvody nárokovány
 - b) stipendia: 12 000 Kč
mimořádná stipendia v celkové výši 12 000 Kč (1 × 4 000 Kč + 4 × 2 000 Kč) byla přiznána za pomoc při řešení úkolu (transport měřicí techniky, stavba a demontáž skládaných zářičů, sumarizace dat, dílčí vyhodnocení měření, orientační logatomické a poslechové testy) ID 24311 Huček Jakub, ID 24571 Prokop Martin, ID 24992 Rulc Jakub, ID 24532 Sýkora Martin, ID 21131 Weis Radek.
 - c) materiálové náklady: 16 476 Kč
vlnový snímač ME36 (doplňek k analyzátoru NTi XL2) pro směrová měření z pozice posluchače.
 - e) náklady nebo výdaje na služby: 58 747 Kč
38 840 Kč rozšíření měřicího rozsahu analyzátoru NTi XL2
4 307 Kč výměna akumulátoru a kalibrace analyzátoru NTi XL2
10 648 Kč pronájem akustických laboratoří a měřicí techniky
4 950 Kč pronájem objektu pro akustická měření
 - g) cestovné: 10 910 Kč
služební cesty - Akustické laboratoře FEL ZČU Plzeň
- Rozpočet projektu byl přečerpán o 12 Kč.

PŘÍLOHA A



Obr.1 Reproduktorové stěny 4 × 8 v aule OSV



Obr.2 Montáž reproduktorového sloupu (24 zářičů)



Obr.3 Instalace 2m reproduktorového sloupu na pódiu auly OSV

PŘÍLOHA B



Obr.4 Příprava akustických měření v kostele sv. Voršily



Obr.5 Přední část lodi kostela sv. Voršily

PŘÍLOHA C

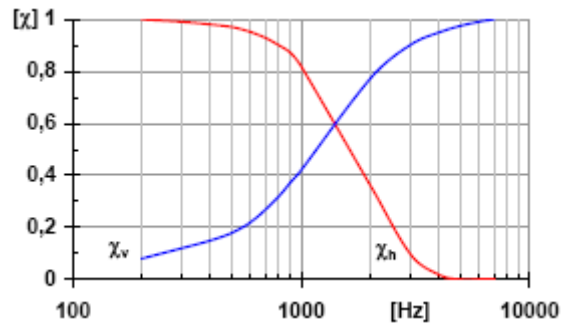


Obr.6 Montáž skládaných zářičů 2 × 16 v Husově sboru

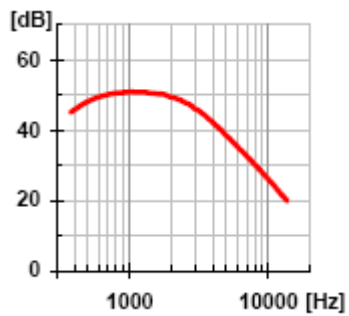


Obr.7 Referenční zdroj NTi TalkBox na kazatelně Husova sboru při měření přenosových vlastností ozvučovacího systému

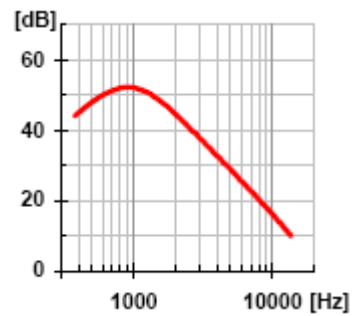
PŘÍLOHA D



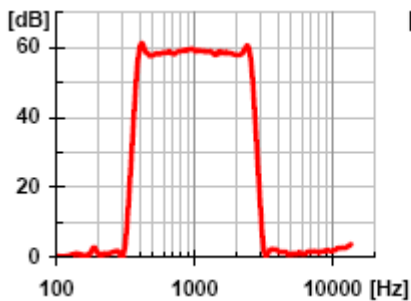
Obr.8 χ charakteristiky pro korekci srozumitelnosti [2]



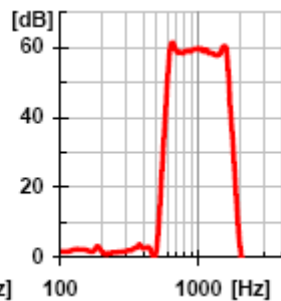
**Obr.9 Pásmová propust
500 Hz až 2,5 kHz, 12 dB/okt
STI 0,97/CIS 99 %**



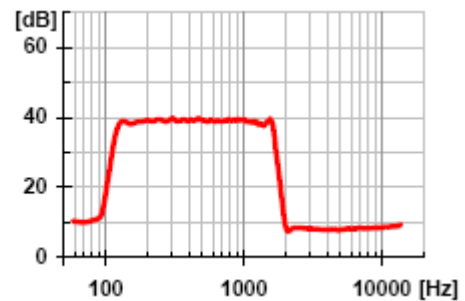
**Obr.10 Pásmová propust
700 Hz až 1,2 kHz, 12 dB/okt
STI 0,91/CIS 96 %**



**Obr.11 Pásmová propust
400 Hz až 2,5 kHz, -60 dB
STI 0,68/CIS 83 %**



**Obr.12 Pásmová propust
630 Hz až 1,6 kHz, -60 dB
STI 0,51/CIS 71 %**



**Obr.13 Pásmová propust
160 Hz až 1,6 kHz, -30 dB
STI 0,89/CIS 95 %**