

# AKUSTICKÉ LISTY

České akustické společnosti  
www.czakustika.cz

ročník 11, číslo 3

září 2005

## Obsah

|                                                                                                                                                                                                             |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Životní jubileum prof. Zdeňka Škvora</b>                                                                                                                                                                 | <b>3</b> |
| <b>Agenturní zprávy České tiskové kanceláře</b>                                                                                                                                                             | <b>3</b> |
| <b>Poznatky z měření polí ultrazvukových měničů určených pro fyzioterapii</b><br>Some details from measurement of ultrasonic transducers applied in physiotherapy<br><i>Rudolf Bálek a Zuzana Bartáková</i> | <b>5</b> |
| <b>Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů</b><br>Comparison of objective criteria of concert halls quality<br><i>Martin Vondrášek a Michael Antek ml.</i>                                 | <b>9</b> |

ČESKÁ AKUSTICKÁ SPOLEČNOST



## Životní jubileum prof. Zdeňka Škvora



Prof. Škvor se narodil 21. srpna 1935 v Písku. Tam také vystudoval gymnázium. Ve studiích pokračoval na Fakultě elektrotechnické ČVUT, kde absolvoval v roce 1958 v oboru rozhlasová, filmová a televizní technika, a poté tam také nastoupil jako odborný asistent.

Hned od počátku své profesní kariéry se věnoval elektroakustice, ve které získal postupně kandidaturu (1967), habilitaci (1974), velký doktorát (1986) a profesuru (1986).

Výzkumné aktivity soustředil především na oblast elektroakustických měničů, které byly námětem jak jeho kandidátské práce (elektrostatický měnič), tak i publikací z poslední doby (především náhradní obvody kmitajících těles). V této oblasti je autorem řady patentů a publikací, z nichž připomeňme alespoň monografii *Akustika a elektroakustika* vydanou v roce 2001 nakladatelstvím Academia a knihu *Vibrating Systems and Their Equivalent Circuits* z roku 1991 vydanou v Elsevier.

Pozoruhodná je i jeho pedagogická činnost, kdy za hlavní počin může být považováno koncipování doktorského studijního programu v oboru Akustika a výchova mnoha doktorandů. Několikrát působil i jako pozvaný profesor na Université du Maine. Za své vědecké, pedagogické a další zásluhy získal mnohá ocenění jak doma (zlatá Falberova medaile), tak i v zahraničí (zlatá medaile Francouzské akustické společnosti, zlatá medaile na výstavě EUREKA 97 v Bruselu).

Mimoprofesionální aktivity prof. Škvora zahrnují hru na flétnu, malbu, četbu a chalupaření. Do dalších let přejeme oslavenci hodně zdraví a úspěchů.

Libor Husník

## Agenturní zprávy České tiskové kanceláře

V nedávné době se v tisku objevilo několik článků týkajících se problematiky hluku v České republice. Většina článků vychází z agenturních zpráv České tiskové kanceláře (ČTK), které na tomto místě bez jakýchkoliv úprav otiskujeme. Na zasedání Rady ČsAS bylo schváleno usnesení, že se od výroků zde uvedených Česká akustická společnost distancuje, a dále, že budeme o zmiňovaných projektech zjišťovat upřesňující informace.

redakce

### Národní hluková observatoř si u EK postěžovala na ČR

BRUSEL 10. června (zpravodaj ČTK) Česká republika ignoruje normy Evropské unie pro snižování hlukové zátěže obyvatelstva, ani dosud nepřevzala do svého práva příslušnou směrnici EU. Na tento stav upozornil ve stížnosti určené komisaři pro životní prostředí předseda sdružení Národní hluková observatoř ČR Ivo Vaněk.

„Požádali jsme evropského komisaře Stavrose Dimase o stanovisko k marasmu, v jakém je ČR," řekl ČTK Vaněk. Hluková zátěž v Česku se podle něj dosud měří „naprosto nevěrohodnými metodami", ale změna by mohla ovlivnit i investice do dopravní infrastruktury v řádu desítek miliard korun ročně.

EK loni v prosinci Prahu upozornila, že dosud směrnici o hluku nepřevzala, ačkoliv lhůta vypršela v polovině července; podobná upozornění se týkala i dalších direktiv a států. Na ředitelství EK pro životní prostředí se nyní připravuje druhé varování, po němž by mohla následovat i soudní žaloba a nakonec sankce.

Český zákon o hluku, přebírající směrnici, vetoval 9. února prezident Václav Klaus, a to hlavně kvůli nesouvisejícímu zákazu privatizace nemocnic. Ale Klausovi se nezamlouvaly ani požadavky směrnice. O dva týdny později poslanci nedokázali prezidentovo veto přehlasovat. Nový návrh chystá ministerstvo zdravotnictví.

„Zákon velice chybí, ale problém tkví hlavně v nedostatku osvěcenosti našich politiků. Jako členové EU jsme přece povinni řídit se závaznou směrnicí, ale to naši politici vůbec nepřipouštějí," míní Vaněk. „Realita je naprosto zoufalá, hluk se měří primitivními metodami, které neodpovídají skutečné hlukové zátěži. Ale všichni se zuby nehty brání evropské metodice, protože ta by vše zprůhlednila," tvrdí.

Na zdravotní rizika z hlukové zátěže podle sdružení upozornila například ložská studie o barrandovské radiále, podle níž téměř polovina z 25.000 obyvatel v okolí je vystavena

nebezpečně vysoké úrovni hluku. Snížení zátěže by si vyžádalo investice zhruba 210 milionů korun, ale ty by se podle Vaňka vrátily během pár let ve snížení nákladů na léčení.

Národní hluková observatoř chce podle svých iniciátorů vyplnit prostor mezi zákony EU a České republiky. Ve sdružení jsou například ředitelé Centra dopravního inženýrství v Brně Josef Mikulík, Národní referenční laboratoře pro hluk Tomáš Hellmuth i prezident České akustické společnosti Josef Novák. Vaněk působil také jako ředitel firmy Timberland, zabývající se metodami snižování hluku ve stavebnictví, například vývojem protihlukových panelů.

Datum vydání: 10.6.2005

**Bez zákona o hluku hrozí Česku, že přijde o část evropských peněz**

PRAHA 24. června (ČTK) I bez zákona o hluku, který vetoval prezident Václav Klaus, připravuje ministerstvo zdravotnictví mapování hluku ve velkých aglomeracích, v okolí silnic, železnic a letišť. Ve spolupráci s ministerstvem dopravy chystá výběrová řízení na zhotovení hlukových map. Bez nich Česku hrozí, že si nebude moci sáhnout na peníze z evropských fondů, které unie bude v letech 2007 až 2008 rozdělovat na projekty snižování hlukové zátěže, řekl ČTK hlavní hygienik Michael Vít.

První verzi zákona, který má koncepční charakter a vychází z evropské směrnice, vetoval prezident 9. února. Mimo jiné se mu nelíbilo, že k předpisu byl přidán návrh zákazu privatizace nemocnic. O dva týdny později poslanci nedokázali prezidentovo veto přehlasovat. Vít je přesvědčen, že bez kontroverzního přívažku by zákon byl schválen.

Nový návrh předpisu předloží ministerstvo vládě zhruba za měsíc. Kromě rizika, že bude stát bez předpisu ochuzen o možnost čerpat peníze ze společných evropských fondů, tíží hlavního hygienika i nedostatek personálu. Až po schválení zákona totiž bude moci navýšit počet zaměstnanců, kteří mu nyní na správu hlukové agendy chybí.

Hlukové mapy mají komplexně vyhodnotit zátěž nejrizikovějších míst, podle nich budou později stanoveny lokality, které potřebují nejvíc ulehčit, například výstavbou protihlukových zábran. Ministerstvo dopravy má už nyní k dispozici hlukové mapy silnic první třídy, pravidelně je sledován hluk také v třech desítkách největších českých a moravských měst.

První hlukovou vyhlášku vydalo tehdejší Československo v roce 1977, od té doby hygienici sledují hladinu hluku technikou a metodami odpovídajícími mezinárodním standardům. Nezávisle na dosud nepřijatém zákonu také v zemi platí hlukové limity.

Datum vydání: 24.6.2005

# Poznatky z měření polí ultrazvukových měničů určených pro fyzioterapii

Rudolf Bálek a Zuzana Bartáková

ČVUT–FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6

email: [balek;slegroz]@fel.cvut.cz

The measurement of ultrasound field in water was realized. The aim of this measurement was to establish the parameters of ultrasonic transducers with regard to standard ČSN EN 60601-2-5. We use the  $x$ - $y$ - $z$  scanning system with calibrated hydrophone and digital oscilloscope controlled together by PC. The output data was processed by software Matlab. The experimental system proves competent and the results are in good agreement with standard.

## 1. Úvod

Každý, kdo se zabývá ultrazvukem, je dříve nebo později postaven před problém stanovení vlastností ultrazvukových měničů. Ať už se jedná o komerčně dodávané měniče či o vlastní zařízení, nelze zpravidla jejich skutečné vlastnosti a tím i parametry generovaného ultrazvukového pole určit pouze výpočtem. Obzvláště důležitá jsou tato měření u ultrazvukových zařízení pro medicínské účely, kde je třeba zajistit, aby pacient nebyl ohrožen překročením povolených hodnot výkonu pronikajícího ultrazvuku. Metodika měření parametrů zdravotnických ultrazvukových přístrojů je u nás dána normou ČSN EN 60601-2-5 (36 4800) [1] s odkazem na normu ČSN EN 61689 (36 4886). Na měření jsou kladeny poměrně vysoké nároky, zejména na přesnost skenovacího systému a na použitý hydrofon, a tak pokud je nám známo, není v České republice mnoho pracovišť, která by byla schopna tato měření realizovat. V následujícím příspěvku se proto budeme věnovat našim zkušenostem s měřením polí ultrazvukových měničů pro fyzioterapii a stanovení jejich parametrů právě s ohledem na výše zmíněnou normu.

## 2. Teorie a metodika měření

Výchozí metodou pro měření pole ultrazvukových měničů je analýza tohoto pole ve vodě pomocí hydrofonu. Během měření musí být zajištěno, aby nedocházelo ke kavitaci. Mají-li být výsledky použity pro stanovení absolutních hodnot akustického výkonu, mělo by se jednat o vodu deionizovanou. Pro posouzení vlastností ultrazvukových měničů norma používá a definuje především následující parametry:

- výstupní akustický výkon  $P_{\text{OUT}}$  [W]
- efektivní vyzařovací plocha  $A_{\text{ER}}$  [cm<sup>2</sup>]
- efektivní intenzita  $I_{\text{ef}}$  [W.cm<sup>-2</sup>]
- nerovnoměrnost svazku  $R_{\text{BN}}$  [-]
- vyzařovaný kmitočet [Hz]

### 2.1. Stanovení výstupního akustického výkonu $P_{\text{OUT}}$

Dle normy ČSN EN 60601-2-5 je doporučeno zjišťovat výstupní akustický výkon radiační metodou (takzvaným vážením na váze) dle normy IEC 1161. Pro konstrukci váhy s kónickým odražečem s koeficientem odrazu  $R = 1$  platí

$$P_{\text{OUT}} = \frac{m g c}{2 \cos^2(\alpha)}, \quad (1)$$

kde  $m$  je odečtená hmotnost odpovídající tlaku akustického vlnění,  $g$  gravitační zrychlení,  $c$  rychlost šíření ultrazvuku ve vodě a  $\alpha$  úhel sklonu plochy odražeče.

Je-li k dispozici kalibrovaný hydrofon, je možno výstupní výkon stanovit i ze sumace naměřených efektivních hodnot akustického tlaku  $p_{\text{ef},i}$  v rovině kolmé na osu hlavice,

$$P'_{\text{OUT}} = \frac{\sum_{i=1}^N p_{\text{ef},i}^2 s^2}{c \rho}, \quad (2)$$

kde  $N$  je počet měření v rovině,  $s$  je krok skenování a  $\rho$  je hustota vody.

### 2.2. Stanovení efektivní vyzařovací plochy $A_{\text{ER}}$

Stanovení efektivní vyzařovací plochy je z celého měření nejnáročnější. Efektivní vyzařovací plocha  $A_{\text{ER}}$  je definována následovně:

$$A_{\text{ER}} = A_{\text{BCS}}(0) F_{\text{ac}}, \quad (3)$$

kde  $A_{\text{BCS}}(0)$  je průmět plochy průřezu ultrazvukového svazku na čelo měniče – odpovídá přenosu 75 % výkonu.  $A_{\text{BCS}}(0)$  se určí metodou lineární regrese z velikostí průřezu svazku ve čtyřech rovinách kolmých na osu svazku  $A_{\text{BCS}}(z_1)$  až  $A_{\text{BCS}}(z_4)$ . Ve kterých čtyřech vzdálenostech od čela měniče měření proběhne, je v normě rovněž stanoveno, a to na základě měření polohy posledního maxima akustického tlaku na ose měniče  $z_n$ .

Pro  $z_n \geq 8$  cm bude:

$z_1 = 1$  cm,  $z_2 = 2$  cm,  $z_3 = 4$  cm,  $z_4 = 8$  cm.

Pro  $4 \text{ cm} < z_n < 8 \text{ cm}$  bude:

$$z_1 = 1 \text{ cm}, z_2 = z_1 + (z_n - z_1)/3, z_3 = z_1 + 2(z_n - z_1)/3, z_4 = z_n.$$

Pro  $z_n \leq 4 \text{ cm}$  bude:

$$z_1 = 0,5 \text{ cm}, z_2 = z_1 + (z_n - z_1)/3, z_3 = z_1 + 2(z_n - z_1)/3, z_4 = 4 \text{ cm}.$$

V každé z rovin je provedeno skenování hydrofonem tak, že všechny skeny jsou čtvercové se středem v ose paprsku – lichý počet hodnot v každé řadě, provádí se měření efektivních hodnot akustického tlaku v každém bodě a meze rastrového skenu mají být dostatečně velké, aby signál za okrají skenované plochy byl minimálně 26 dB pod špičkovou hodnotou signálu, pro měniče s  $z_n \leq 130 \text{ mm}$  má být signál za okrajem skenované plochy minimálně 32 dB pod špičkovou hodnotou. Hodnoty  $A_{\text{BCS}}(z)$  se pak určí jako minimální plocha v určité rovině kolmé k ose paprsku, pro kterou je suma průměrných hodnot čtverců akustických tlaků ( $p_{\text{ef}}^2$ ) 75 % sumy všech průměrných hodnot čtverců akustických tlaků. Pro dostatečně přesné stanovení plochy musí být v této sumaci zahrnuto minimálně 100 prvků.

Parametr  $F_{\text{ac}}$  je určen jako

$$F_{\text{ac}} = 2,58 - 0,0305 \cdot k \cdot a_1, \quad \text{pro } k \cdot a_1 \leq 40 \quad (4)$$

a

$$F_{\text{ac}} = 1,354, \quad \text{pro } k \cdot a_1 \geq 40, \quad (5)$$

kde  $k$  je vlnové číslo ( $2\pi/\lambda$ ) [ $\text{cm}^{-1}$ ],  $a_1$  je efektivní poloměr měniče [cm] a je získán řešením rovnice:

$$\pi a^2 + (0,0305 \cdot k \cdot A_{\text{BCS}}(0)) \cdot a - 2,58 \cdot A_{\text{BCS}}(0) = 0. \quad (6)$$

$F_{\text{ac}}$  se používá k určení plochy, která obsahuje 100 % celkového efektivního akustického výkonu.

### 2.3. Stanovení efektivní intenzity $I_{\text{ef}}$

Efektivní intenzita se stanoví jednoduše jako podíl výstupního akustického výkonu a efektivní vyzařovací plochy,

$$I_{\text{ef}} = P_{\text{OUT}}/A_{\text{ER}}. \quad (7)$$

### 2.4. Určení nerovnoměrnosti svazku $R_{\text{BN}}$

$R_{\text{BN}}$  je poměr kvadrátu maximální efektivní hodnoty akustického tlaku ku prostorovému průměru kvadrátů efektivních akustických tlaků, kde prostorový průměr je počítán přes efektivní vyzařovací plochu.

$$R_{\text{BN}} = p_{\text{max}}^2 \cdot A_{\text{ER}}/(p_{\text{mst}} \cdot a_0), \quad (8)$$

kde  $p_{\text{max}}$  je maximální efektivní akustický tlak,  $A_{\text{ER}}$  je efektivní vyzařovací plocha,  $p_{\text{mst}}$  je součet všech kvadrátů akustických tlaků – průměr ze 4 skenů a  $a_0$  je plocha jednotky rastru.

### 2.5. Vyzařovaný kmitočet

Vyzařovaný kmitočet se zjišťuje na osciloskopu ze signálu hydrofonu ve vzdálenosti posledního maxima na ose měniče.

## 3. Popis měřicího zařízení

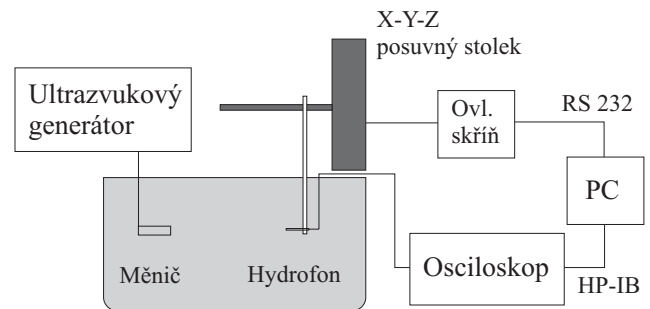
Měřicí pracoviště bylo sestaveno z vany o rozměrech přibližně  $60 \times 35 \times 30 \text{ cm}$  vystlané gumožíňmi, stojanu s držákem ultrazvukového měniče, tříosým krokovým systémem s ovládací skříní a s držákem hydrofonu, hydrofonu, ultrazvukového generátoru, digitálního osciloskopu a PC s řídicím programem, obrázek 1.

Krokový systém sestává z  $x$ - $y$  posuvu 0–100 mm, min. krok 5  $\mu\text{m}$  (posuvný stolek PSS1, Vývojové dílny ČSAV) a z posuvu  $z$  0–100 mm, min. krok 10  $\mu\text{m}$  (lineární posuvný šroub KERK). Krokové motory řídí desky Microcon [2], spojené s PC přes sériový port. Při měření byl použit krok 0,5 mm a 1 mm.

Pro měření byl použit PVdF hydrofon od firmy Precision Acoustics Ltd.

Odečítání dat z osciloskopu Hewlett Packard 54645D je zajištěno řídicím programem přes sběrnici HP-IB. Tento program zároveň zajišťuje komunikaci s ovládací jednotkou krokového systému po RS 232 a byl sestaven speciálně pro tuto aplikaci.

Měřeny byly kruhové měniče s vyzařovacími plochami  $1 \text{ cm}^2$  a  $4 \text{ cm}^2$ , které mohou pracovat na frekvencích 1 a 3 MHz.



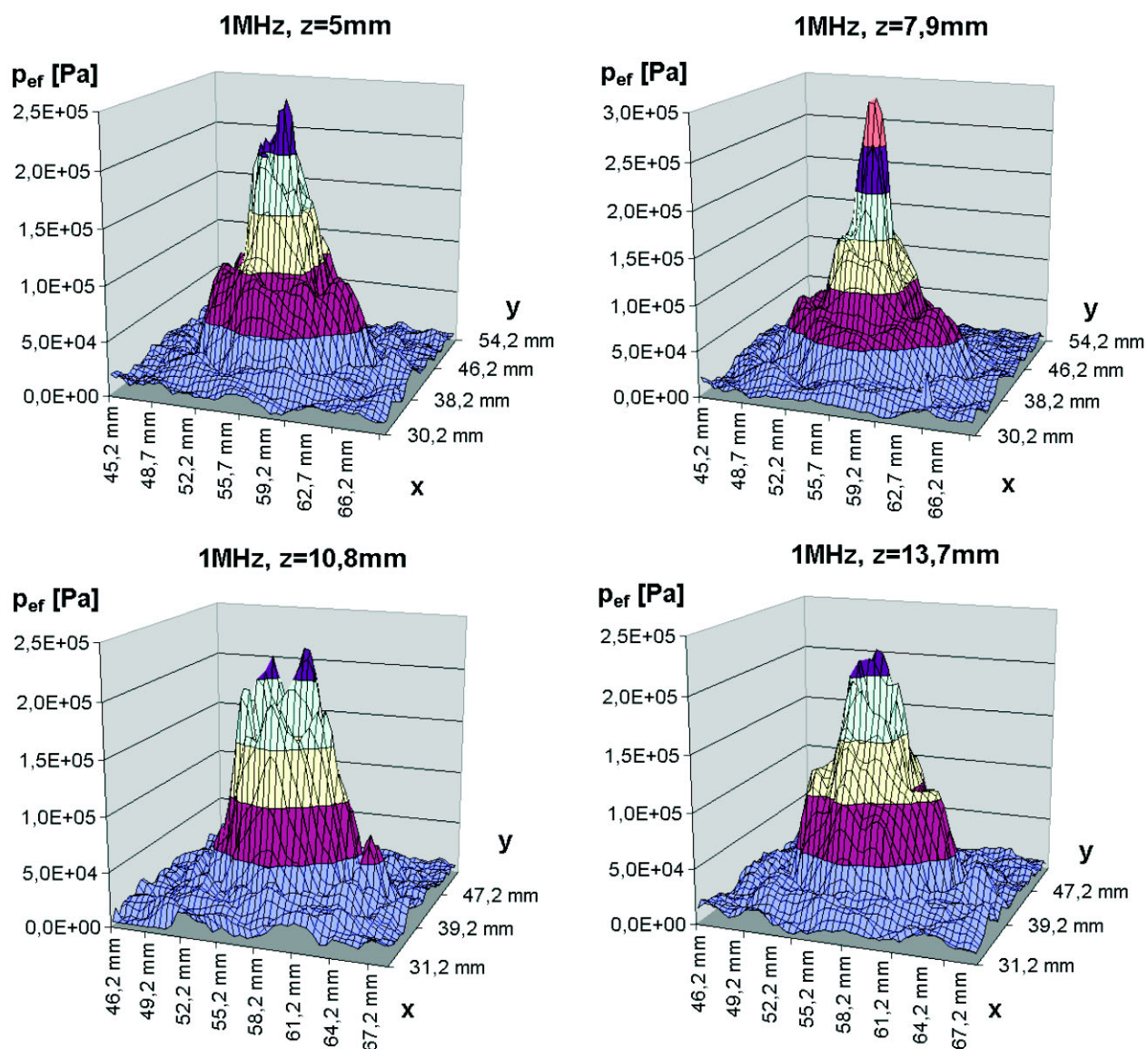
Obrázek 1: Měřicí pracoviště

## 4. Zpracování měření, výsledky

Výstupem měřicího programu jsou data ve formě tabulek. Pro zpracování naměřených dat byly využity programy Excel a Matlab. Výpočty probíhaly podle výše uvedených vztahů. Bližší popis si zaslouží výpočet jednotlivých ploch průřezu svazku  $A_{\text{BCS}}(z)$ . Tento výpočet byl realizován následovně: Převedeme pole na jednorozměrné a prvky seřadíme podle velikosti. Vypočteme celkovou sumu prvků a počet prvků, pro které je suma 75 % z celkové sumy. Plochu průřezu paprsku získáme jako součin plochy jedné buňky skenu a počtu prvků pro přenesení 75 % celkového výkonu.

Na obrázku 2 je ukázka zobrazení ultrazvukového pole od měniče s plochou  $1 \text{ cm}^2$  v různých vzdálenostech  $z$  od povrchu.

Výsledky z měření hydrofonem získané pro oba měřené měniče jsou uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 2: Zobrazení ultrazvukového pole od měniče s plochou  $1\text{ cm}^2$  ve čtyřech různých vzdálenostech  $z$  od povrchu, skenování provedeno s krokem  $0,5\text{ mm}$

| plocha měniče                                 |                 | 1 cm <sup>2</sup>      |                        | 4 cm <sup>2</sup>      |                        |
|-----------------------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| kmitočet                                      |                 | 1,02 MHz               | 3,2 MHz                | 0,975 MHz              | 3,1 MHz                |
| maximální výstupní výkon $P_{\text{OUT}}$     |                 | 1,2 W                  | 0,9 W                  | 2,6 W                  | 6,6 W                  |
| efektivní vyzařovací plocha $A_{\text{ER}}$   |                 | 0,77 cm <sup>2</sup>   | 0,61 cm <sup>2</sup>   | 2,83 cm <sup>2</sup>   | 3,36 cm <sup>2</sup>   |
| maximální efektivní intenzita $I_{\text{ef}}$ | požadavek normy | <3 W/cm <sup>2</sup>   | <3 W/cm <sup>2</sup>   | <3 W/cm <sup>2</sup>   | <3 W/cm <sup>2</sup>   |
|                                               | naměřeno        | 1,54 W/cm <sup>2</sup> | 1,49 W/cm <sup>2</sup> | 0,91 W/cm <sup>2</sup> | 1,96 W/cm <sup>2</sup> |
| nerovnoměrnost svazku $R_{\text{BN}}$         | požadavek normy | <8                     | <8                     | <8                     | <8                     |
|                                               | naměřeno        | 4                      | 2,3                    | 3,4                    | 1,7                    |

Tabulka 1: Výsledky měření

## 5. Závěr

Navržené a sestavené pracoviště pro zobrazování ultrazvukových polí a měření parametrů ultrazvukových měničů se ukázalo být plně funkční a vyhovující i pro měření ultrazvukových měničů pro fyzioterapii a stanovení jejich parametrů s ohledem na normu ČSN EN 60601-2-5. Jak je patrné z grafů na obrázku 2, naměřená data poskytují dobrou představu o rozložení akustického tlaku a navíc poskytují i dostatek podkladů pro výpočet parametrů měničů dle normy. Výsledky shrnuté v tabulce 1 dokládají, že testované měniče by tuto normu splnily ve všech sledovaných parametrech.

## Poděkování

Projekt vznikl v rámci výzkumného záměru ČVUT v Praze MSM6840770015 „Výzkum metod a systémů pro měření fyzikálních veličin a zpracování naměřených dat“ financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

## Reference

- [1] ČSN EN 60601-2-5 (36 4800), ČSN EN 60601-2-5 (třídící znak 36 4800) Zdravotnické elektrické přístroje. Část 2–5: Zvláštní požadavky na bezpečnost ultrazvukových fyzioterapeutických přístrojů. Předmětem této zvláštní normy je stanovení zvláštních požadavků na bezpečnost ultrazvukových fyzioterapeutických přístrojů, používaných v lékařské praxi. ČSN EN 60601-2-5 byla vydána v září 2001. Nahradila ČSN IEC 601-2-5 ze srpna 1997. <http://www.technickenormy.cz/>
- [2] Microcon, <http://www.microcon.cz/>

# Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů

Martin Vondrášek<sup>a</sup> a Michael Antek ml.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>SONING Praha, a. s., Plzeňská 66, 151 24 Praha 5, <sup>b</sup>student ČVUT, Fakulta elektrotechnická  
email: martin.vondrasek@soning.cz

This work is compilation of many technical research reports, professional articles, recommendations and standards. There is missing brief overview of criteria of soundfield qualities in concert and opera auditoriums in czech literature. Even professional public is not familiar with some of those criteria. Main topic of this work is this brief overview which is than used to show one possible way to obtain single value classification of auditorium acoustical quality. Afterwards there will be shown interaction between single value criteria and subjective classification.

## 1. Úvod

Tato práce není původní prací. Je kompilací mnoha výzkumných zpráv, odborných článků, doporučení a norem. Jelikož však v české literatuře doposud chybí byť jen stručný přehled používaných kritérií kvality zvukového pole koncertních a operních sálů, z nichž některá jsou i mezi odbornou veřejností téměř neznámá, je užitečné uvést alespoň jejich stručný přehled. Na základě tohoto bude dále ukázán jeden z možných způsobů získání jednočíselné klasifikace akustické kvality sálů a jeho vzájemná interakce mezi subjektivním hodnocením.

## 2. Akustické parametry sálů

Akustické hodnocení sálů popisujících jejich kvalitu můžeme rozdělit na subjektivní a objektivní. V dalších kapitolách se budeme zabývat pouze hodnocením objektivních kritérií, která rozdělujeme na časová, energetická a ostatní, která nelze zařadit ani do jedné z předešlých dvou skupin.

### 2.1. Časová a frekvenční kritéria

Tato kritéria se stanovují z časového úseku poklesu dozvukové křivky, mezi nejpoužívanější patří doba dozvuku a počáteční doba dozvuku. Mezi frekvenční kritéria můžeme zařadit poměr basových a vysokých kmitočtů.

#### Doba dozvuku *RT* (*Reverberation Time*)

Zvuk, který se šíří prostorem po vypnutí zvukového zdroje, nazýváme dozvuk. Abychom jej mohli charakterizovat kvantitativně, definujeme dobu dozvuku jako dobu, za kterou klesne hustota zvukové energie nebo intenzita zvuku po vypnutí zvukového zdroje na  $10^{-6}$  původní hodnoty, tj. pokles o 60 dB. Pro standardní dobu dozvuku používáme značení  $T_{60}$  (*RT*). Je určena přímkou se směrnici  $b$ , proloženou dozvukovým poklesem  $D(t)$  v úseku mezi hladinami  $D = -5$  dB až  $D = -35$  dB

$$T_{60} = -\frac{60}{b}. \quad (1)$$

Dozvukový pokles  $D(t)$  je definován

$$D(t) = 10 \log \left( 1 - \frac{E_t}{E_\infty} \right). \quad (2)$$

#### Počáteční doba dozvuku *EDT* (*Early Decay Time*)

Jak počáteční doba dozvuku *EDT*, tak standardní doba dozvuku *RT* se získávají měřením ze sklonu křivek oktavového pásma integrované impulsové odezvy. Sklon křivky poklesu by se měl určit ze sklonu regresní přímky proložené příslušnou částí křivky poklesu. Počáteční doba dozvuku *EDT* se získává z počátečních 10 dB poklesu a doba dozvuku *RT* se získává z části poklesu mezi úseky  $-5$  dB a  $-35$  dB pod maximální počáteční hladinou. Doby dozvuku se z těchto sklonů vypočítají jako doby potřebné k poklesu o 60 dB.

Veličina *EDT* lépe koreluje s vnímaným dozvukem prostoru, zatímco *RT* se týká fyzikálních vlastností poslechového prostoru.

#### Míra hlubokých tónů *BR* (*Bass Ratio*)

Je míra podpory hlubokých tónů doznívání sálu. Určí se z poměrů dob dozvuku v oktavových pásmech 125 a 250 Hz k době dozvuku v oktavových pásmech 500 a 1000 Hz

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}}, \quad (3)$$

kde  $RT_{125}$  je doba dozvuku v oktavovém pásmu 125 Hz,  
 $RT_{250}$  je doba dozvuku v oktavovém pásmu 250 Hz,  
 $RT_{500}$  je doba dozvuku v oktavovém pásmu 500 Hz,  
 $RT_{1000}$  je doba dozvuku v oktavovém pásmu 1000 Hz.  
Hodnoty *BR* by měly být blízké od shora 1, neměly by však klesnout pod tuto hodnotu.

#### Míra vysokých tónů *HFR* (*High Frequency Ratio*)

Míra vysokých tónů *HFR* je dána vztahem

$$HFR = \frac{RT_{500} + RT_{1000}}{RT_{2000} + RT_{4000}}, \quad (4)$$

kde  $RT_{500}$  je doba dozvuku v oktavovém pásmu 500 Hz,  
 $RT_{1000}$  je doba dozvuku v oktavovém pásmu 1000 Hz,

$RT_{2000}$  je doba dozvuku v oktávovém pásmu 2000 Hz,  
 $RT_{4000}$  je doba dozvuku v oktávovém pásmu 4000 Hz.  
 Hodnoty  $HFR$  mají být blízké od zdola 1, neměly by se však od této hodnoty výrazně odchylovat.

## 2.2. Energetická kritéria (*Energy Criteria*)

Tato kritéria vychází z energetických poměrů signálů pro definované časové úseky průběhů získané impulsové odezvy prostoru.

### Míra přímého zvuku $C_7$

Je definována poměrem energií přicházejících do 7 ms k energii od 7 ms. Její hodnota je udávána v decibelech a používá se k predikci síly přímého zvuku zdroje (lokali-zace přímého zvuku).

$$C_7 = 10 \log \frac{\int_0^{7 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{7 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_7}{E_{\infty} - E_7} \quad (5)$$

Hodnoty nad  $-15$  dB připouští dobrou lokalizaci zvuku zdroje. Čím více se hodnoty blíží 0 dB, tím lepší je hodnota lokalizace zvuku zdroje. V lit. [1] se uvádí jako hodnota přímého zvuku hranice 5 ms.

### Míra zřetelnosti $C_{50}$

Tato hodnota udává akustické kritérium srozumitelnosti pro řeč. Je definována poměrem energie přicházející do 50 ms k energii přicházející po 50 ms a její hodnota je v decibelech.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \quad (6)$$

Každá hodnota nad 0 dB v standardní místnosti ukazuje na dobrou srozumitelnost mluveného slova. Hodnoty pod  $-5$  dB ukazují na více odraznou místnost, než by byla vhodná pro přednes mluveného slova.

### Míra jasnosti $C_{80}$

Zakotvená v normě ČSN 73 0525 udává akustické kritérium pro hudbu (definována pro oktávové pásmo 1000 Hz) a je definována 10násobkem dekadického logaritmu poměru zvukové energie do 80 ms a po 80 ms.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \quad (7)$$

V současné době představuje zatím nejlepší korelát poslechového atributu „jasnost“ pro časové rozlišení tónů v rychlých hudebních pasážích. Optimální hodnoty  $C_{80}$  silně záleží na hudebním žánru, obecně lze považovat za optimální hodnoty v rozmezí  $1 \pm 2$  dB. Pro romantickou hudbu by měly ležet v rozsahu hodnot  $-2$  dB až  $+4$  dB, zatímco pro klasicistní a moderní hudbu je rozsah hodnot 0 dB až  $+6$  dB. Podle [2] je hodnota maximální difference  $\Delta C_{80}$  pro příslušný styl hudby rovna  $\pm 3$  dB. Bližší určení optimálních hodnot  $C_{80}$  je v následujícím přehledu.

Rozsahy přípustných hodnot  $C_{80}$  pro jednotlivé hudební žánry:

- $0 \pm 2$  dB je ideální pro varhanní hudbu nebo dechové nástroje při pomalejším tempu. To je ideální pro sály určené pro varhanní recitály.
- $2 \pm 2$  dB je ideální pro smyčcové nástroje a nejlépe je prezentována v sálech určených pro instrumentální hudbu, tempo hudby je rychlejší. To je také vhodné pro sborový zpěv.
- $4 \pm 2$  dB je ideální pro drnkací a trsací nástroje, tempo hudby je rychlejší. Je vhodná pro folkovou a lehkou populární hudbu.
- $6 \pm 2$  dB je ideální pro hudbu nástrojů s perkusním průběhem, rock and roll a současnou moderní hudbu.
- Hodnota 8 dB a více by neměla být překročena v žádném místě.

### Zřetelnost $D_{50}$ (*Objective clarity*)

Tato hodnota je definována poměrem energií časových úseků

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{50}}{E_{\infty}} \quad (8)$$

Hodnoty zřetelnosti jsou svou hodnotou ekvivalentem parametru srozumitelnosti řeči  $C_{50}$ . Vzájemný přepočtení mezi těmito parametry je definován vztahy

$$C_{50} = 10 \log \frac{D_{50}}{1 - D_{50}} ; \quad D_{50} = \frac{10^{0,1 \cdot C_{50}}}{1 + 10^{0,1 \cdot C_{50}}} \quad (9)$$

### Síla zvuku $G$ (*Strength of arriving energy*)

Zakotvená v normě ČSN 73 0525 udává míru hlasitosti. Nejvíce odpovídá subjektivnímu parametru hlasitost.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{\infty}}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \quad (10)$$

kde  $p_A(t)$  je impulsová odezva snímaná ve volném poli (přímý zvuk) v referenční vzdálenosti 10 m od všesměrového zdroje zvuku. Jednočíselný údaj míry hlasitosti je zcela nedostatečný. Ve světové literatuře jsou proto užívány míry hlasitosti:  $G_L$ ,  $G_{EL}$ ,  $G_M$ ,  $G_{EM}$ ,  $G_H$  a  $G_{EH}$  [3], [4], [5] s indexy

- **L (low)** značí prostý průměr pro oktaóvová pásma se středními kmitočty 125 a 250 Hz,
- **M (mid)** prostý průměr pro oktaóvová pásma se středními kmitočty 500 a 1000 Hz,
- **H** prostý průměr pro oktaóvová pásma se středními kmitočty 500 až 4000 Hz,
- **E** integrační meze  $t_1 = \infty$  a  $t_2 = 80$  ms.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{t_1} p^2(t) dt}{\int_0^{t_2} p_A^2(t) dt} \quad (11)$$

Optimální rozmezí  $G_{\text{mid}}$  je +4,0 až +5,5 dB. Pro koncertní sály je optimální rozmezí rozdílů hodnot  $G_L - G_H$ , resp.  $G_{EL} - G_{EH}$  v rozmezí -2,4 až +1,0 dB se středem -0,9 dB.

Pro rychlé zjištění hodnoty míry hlasitosti lze použít zjednodušený vztah

$$G_{\text{pred.}} = 10 \log \left( \frac{T_{60}}{V} \right) + 45, \quad (12)$$

kde  $V$  je objem prostoru a  $T_{60}$  příslušná doba dozvuku.

### Čas těžiště impulsové odezvy $t_s$ (Center Time)

Čas těžiště impulsové odezvy je úzce svázán s hodnotou  $C_{80}$  a má obdobné využití. Tato veličina má vypovídací hodnotu prostorového dojmu a jasnosti pro hudbu a mluvené slovo.

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{E_{\infty}} \quad (13)$$

Pro hudbu se hodnoty v oktaóvovém pásmu 1000 Hz pohybují v rozsahu 70 až 150 ms, pro řeč v oktaóvových pásmech 500 až 4000 Hz jsou hodnoty v rozsahu 60 až 80 ms.

### Míra dozívání $H$ (Reverberance Measure)

Míra dozívání popisuje dozvukový prostorový dojem hudebního výkonu. Vypočítá se pro oktaóvové pásmo 1000 Hz

z dekadického logaritmu poměru zvukové energie od 50 ms ku energii přicházející v čase do 50 ms.

$$H = 10 \log \frac{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{\infty} - E_{50}}{E_{50}} \quad (14)$$

Ze vztahů (6) a (14) můžeme vyjádřit vzájemnou souvislost mezi mírou dozívání  $H$  a mírou zřetelnosti  $C_{50}$ .

$$H = -C_{50} \quad (15)$$

Obdobně můžeme pomocí vztahu (8) provést i pro parametr zřetelnosti  $D$ .

$$H = 10 \log \frac{1 - D_{50}}{D_{50}} \quad (16)$$

### InterAural Cross correlation Coefficient IACC

Proces slyšení je binaurální. Subjektivní studie poslecho- vých prostorů ukázaly, že činitelé interaurální vzájemné korelace  $IACC$ , měřené buď umělou hlavou, nebo za pomoci reálného posluchače, kde u vstupu zvukovodu (ušních boltců) jsou umístěny mikrofony, dobře korelují se subjektivní kvalitou „dojmu prostorovosti“ v koncertním sále. Normalizovaná funkce interaurální vzájemné korelace  $IACF$  je definována vztahem

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \quad (17)$$

kde  $p_l(t)$  je impulsová odezva na vstupu do levého ušního kanálu a  $p_r(t)$  totéž pro pravý ušní kanál.

Činitel interaurální vzájemné korelace  $IACC$  je dán rovnicí

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)|, \quad -1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms} \quad (18)$$

Hodnoty  $1 - IACC_E$  by se měly podle nejpřísnějších požadavků v oktaóvových pásmech 500, 1000 a 2000 Hz pohybovat v rozsahu hodnot 0,4 až 1, kde hodnota 1 znamená maximální rozdílnot zvukových signálů na obou uších, tzn. zvukové pole je maximálně difuzní.

Písmena **E**, **L** a **A** udávají, z jakých integračních časových mezí se určí parametr  $IACC$ .

$$\begin{array}{lll} IACC_E & t_1 = 0 \text{ ms} & t_2 = 80 \text{ ms} \\ IACC_L & t_1 = 80 \text{ ms} & t_2 = 1000 \text{ ms} \\ IACC_A & t_1 = 0 \text{ ms} & t_2 = 1000 \text{ ms} \end{array}$$

Číslo za písmenem udává, pro jaká třetinooktávová pásma je hodnota  $IACC$  určena.

**3** 500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz

**4** 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz a 4000 Hz

Nejlépe hodnocené sály mají hodnoty  $[1-IACC_{E3}]$  okolo 0,6.

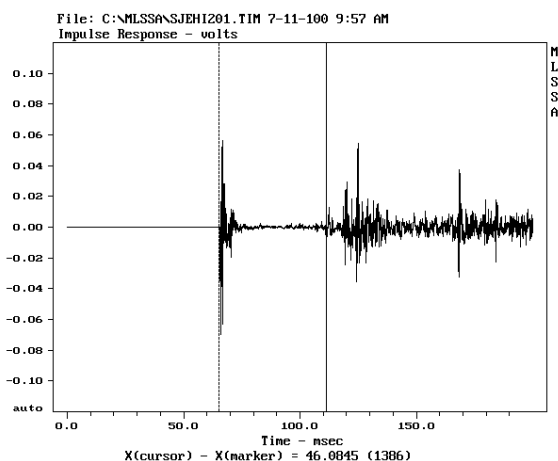
### Lateral Energy Fraction LF

Je získána pomocí „bi-directional“ mikrofónů. Optimální hodnoty by se měly pohybovat mezi 0,1 a 0,25.

$$LF = \frac{\int_{5\text{ ms}}^{80\text{ ms}} p_8^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ ms}} p^2(t) dt} = \frac{E_{80\text{ Bi}} - E_{5\text{ Bi}}}{E_{80}} \quad (19)$$

### Initial Time Delay Gap ITDG

Počáteční prodleva ITDG je časové zpoždění prvních odrazů od bočních stěn a stropu za přímým zvukem s odrazy nejbližších ploch (obvykle podlahy pódia, židlí a stojanů not). Hodnota ITDG je pro celý sál určována z impulsové odezvy obvykle poblíž středu přízemí na jeho podélné ose. Zdroj je umístěn ve středu podélné osy pódia, obvykle 1,5 až 2 m od jeho přední hrany. Příklad je na následujícím obrázku 1. Upřednostňovány jsou hodnoty menší než 20 ms.



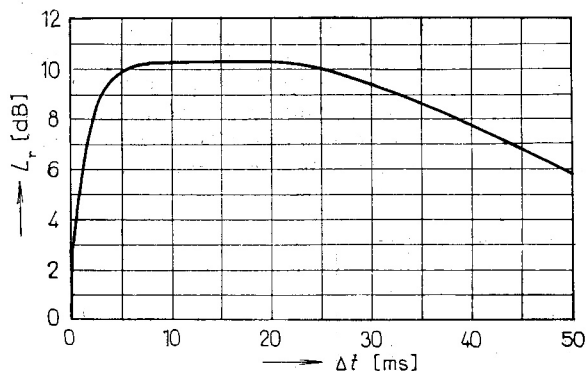
Obrázek 1: Postup vyhodnocení parametru ITDG

### Echo Criterion EK

Dalším důležitým parametrem akustické kvality prostoru souvisejícím s odrazy je přítomnost či nepřítomnost vnímatelné, nebo dokonce rušivé ozvěny.

První práce publikoval počátkem 50. let Helmut Haas [6]. Na vzorku 80 osob, kterým přehrával pomocí dvou reproduktorů řečový signál, sledoval procento posluchačů rušených zpožděným signálem stejné úrovně v závislosti na časovém odstupu a pro 3 různé kadence řeči.

V jiném experimentu zkoumal rušivý účinek zpožděného odrazu v závislosti nejen na časovém odstupu, ale i na jeho relativní úrovni. Výsledky pro střední rychlost řeči jsou na obrázku 2.



Obrázek 2: Závislost stejné hlasitosti vnímaného odrazu na časovém odstupu pro střední kadenci řeči (5,3 slabik/sec)

Z obrázku 2 plyne, že při zpoždění o 10 až 30 ms musí stejné hlasitě slyšitelný odraz mít o +10 dB vyšší úroveň. Tento výsledek bývá v literatuře označován jako „Haasův jev“<sup>1</sup>.

Pro hudební signály konali obdobné pokusy v 60. letech Seraphim a Schubert. Právě Schubertovy práce byly využity u kritéria Textura (obrázek 7).

V 80. letech na tyto práce navázal Dietsch [7]. Výchoziskem jeho práce je Kürerova definice těžiště kvadrátu impulsové odezvy (13), u které sledují průběh náběhu času těžiště váženého kvadrátu impulsové odezvy.

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^{\tau} |p^2(t)|^n t dt}{\int_0^{\tau} |p^2(t)|^n dt}, \quad (20)$$

kde pro řeč je váhový exponent  $n = 0,67$  a pro hudbu  $n = 1,00$ .

Echokritérium  $EK(\tau)$  je potom definováno vztahem

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau_E}, \quad (21)$$

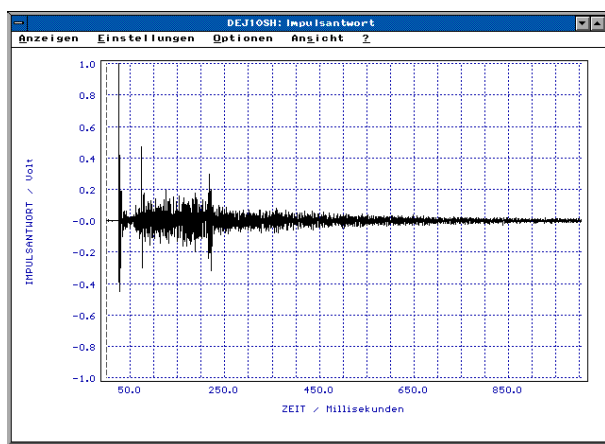
kde pro řeč je  $\Delta \tau_E = 9\text{ ms}$  a  $\Delta \tau_E = 14\text{ ms}$  pro hudbu.

Meze pro takto definované kritérium jsou:

pro řeč  $EK_{09} \quad EK_{10\%} > 0,9$  a  $EK_{50\%} \geq 1,0$ ,  
pro hudbu  $EK_{14} \quad EK_{10\%} > 1,5$  a  $EK_{50\%} \geq 1,8$ .

Indexy 10 % a 50 % značí podíl posluchačů, kteří jsou některým z odrazů rušeni. Na obrázku 4 je výstup původního

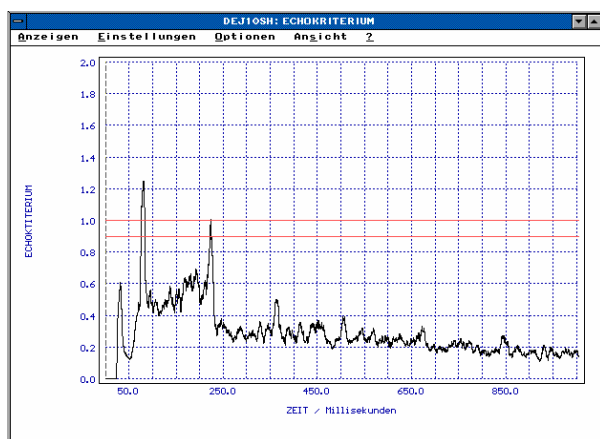
<sup>1</sup>Nezaměňovat s precendenčním jevem – v oblasti pod křivkou stejné hlasitosti Haasova jevu není zpožděný signál vnímán rušivě, navíc posluchač lokalizuje příchod prvního signálu. Tento efekt však objevil Van de Boer, správně by tedy měl být nazýván „Van de Boerův jev“.



Obrázek 3: Impulsová odezva zkoumaného prostoru

Dietschova programu APOS. V současnosti je echokritérium součástí akustického měřicího programu EASRA (představeno na 117<sup>th</sup> AES Convention, October 28–31, 2004 San Francisco, California, USA).

Na průběhu EK09 je jasné vidět to, co v impulsové odezvě není patrné – periodicky se opakující „špičky“. Ty indikují nejen nevhodné odrazy, ale i existenci mnohonásobného odrazu mezi rovnoběžnými stěnami, takzvané třepotavé ozvěny („Flutter-Echo“).



Obrázek 4: Vyhodnocení impulsové odezvy z obrázku 3 programem APOS pro řečové pásmo EK09

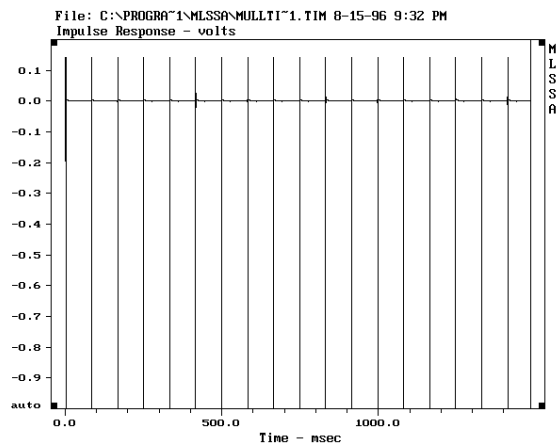
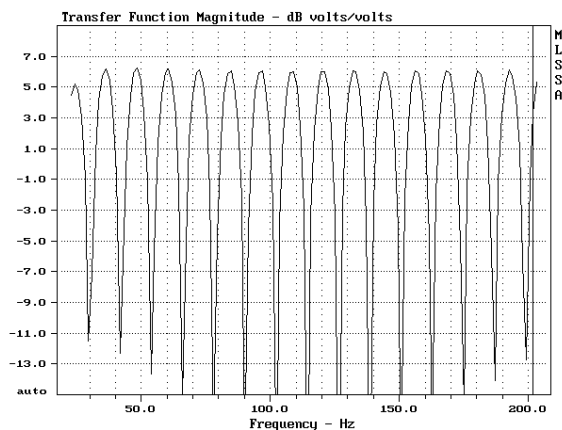
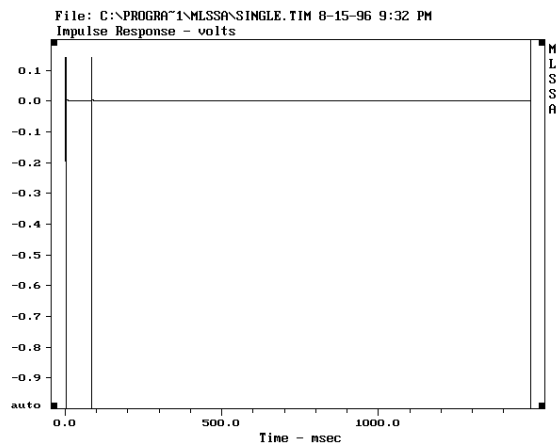
### Surface Diffusion Index SDI

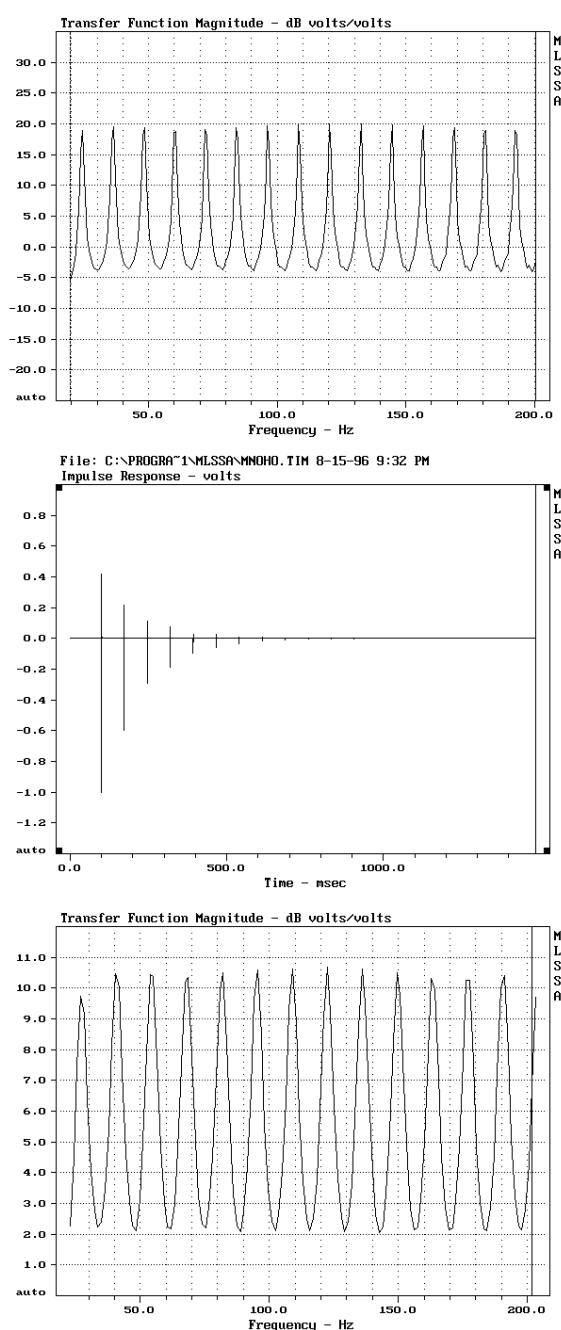
Posluchači obecně preferují, je-li počátek tónů čistý a měkký a přichází-li počátek dozívání z mnoha směrů. Každý úspěšný sál vykazuje makro i mikro nepravidelnosti povrchů ohraničujících stěn. Tyto struktury napomáhají vytvořit difuzní<sup>2</sup> zvukové pole, a tím dodávají zvuku

<sup>2</sup>Difuzní pole je fikce usnadňující výpočty v akustice. Difuzní pole má tři následující vlastnosti: je homogenní (všude konstantní energie), isotropní (tok energie je ve všech směrech konstantní) a platí čistě energetický součet. Dozvukové pole v ustáleném stavu se více či méně blíží difuznímu poli, ale nikdy difuzní není.

měkkost a bohatou „patinu“. Z fyzikálního hlediska difuzní pole ovlivňuje hudební zážitek dvěma způsoby: první je spojen s počátečními odrazy, druhý s dozvukovým polem.

Je-li hudebník nebo posluchač v pravoúhlé místnosti s hladkými stěnami, vždy dochází vlivem interferencí přímého zvuku s „tvrdými“ zpožděnými odrazy ke vzniku „hřebenového filtru“. Pro všechny kmitočty, kdy lichý násobek poloviny jejich vlnové délky  $\lambda$  je roven dráhovému rozdílu ( $d = (2n + 1)\lambda/2$ , kde  $n$  je celé číslo), dochází v místě příjmu k odečítání až vyrušení akustického tlaku. Následkem periodického zvlnění kmitočtové charakteristiky zvuk dostává „tvrdý“, nepříjemný charakter nebo nepříjemnou barvu.





Obrázek 5: Časové a spektrální průběhy pro: a) jediný odraz (první dva obrázky), b) mnohonásobný odraz (třetí a čtvrtý), c) tlumený mnohonásobný odraz (třepotavá ozvěna). Elektronicky simulováno na efektové jednotce Lexicon Alex

„Glare“ je možno pozorovat ve většině moderních sálů. Mají totiž téměř vždy hladké stěny s nedostatkem plastických ornamentů. Drobné nerovnosti, nebo tenký difuzor, snižují energii zrcadlového odrazu v oblasti nad 1 kHz jeho rozptýlením do mnoha směrů.

Pro určování stupně difuze zvukového pole v ustáleném stavu bylo vyvinuto několik více či méně přesných metod, které lze přibližně rozdělit na přímé a nepřímé. První sku-

pinu tvoří metody založené na přímém měření toků akustické energie z jednotlivých směrů směrovými mikrofony či intenzitní sondou, druhá skupina se opírá o srovnání některých naměřených veličin s veličinami, které lze teoreticky stanovit za předpokladu existence ideálně difuzního pole. Nejznámější je Tismerova metoda, používající 6 kardioidních mikrofonů orientovaných ve směrech hlavních os. Tato metoda eliminuje vliv přímého zvuku zavedením hypotetického pole, které je nekoherentní kombinací ideálně difuzního (isotropního) a „přímého“ pole, vztaženou ke spojenci zdroje zvuku a přijímacího bodu. Tato metoda byla přijata technickou komisí OIRT jako doporučení Nr. 35 der OIRT XVIII. Vyhodnocování výsledků je značně zdoluhavé a vyžaduje zvláštní matematický aparát, proto je tato metoda používána pouze pro hodnocení a optimalizaci dozvukových komor.

V současnosti se pro koncertní sály používá kritérium  $IACC_{L3}$ , které lze přirovnat k Tismerově metodě, zjednodušené pouze do jednoho směru. Podle [3] však  $IACC_{L3}$  nedokáže rozlišit sály do více kategorií, pouze na sály s vysokou difuzitou zvukového pole a ostatní.

Odlišnou metodu vypracovali Haan a Fricke (metoda odhadu rozptýlnosti povrchů). Studovali vztah mezi akustickou kvalitou koncertních sál a vizuálním ohledáním stupně nepravidelností povrchů stěn a stropu. Rozsah nepravidelností nazvali „stupeň rozptýlnosti“ (*degree of diffusivity*). Metoda je založena na odhadu a je zjemněna zavedením váhových koeficientů různých typů povrchů.

Kritéria používaná pro kategorizaci stupně rozptýlnosti povrchů jsou:

#### *Vysoce rozptýlné povrchy*

Plasticky kazetované, šachovnicové nebo trámové povrchy, římsy, hluboké výklenky (s hloubkou více než 10 cm) nebo náhodné difuzní elementy po celé ploše (s hloubkou více než 5 cm). Povrch **nesmí** obsahovat žádný pohltivý materiál.

#### *Středně rozptýlné povrchy*

Pilovité nebo „rozlámané“ povrchy, dekorativní ornamenty s hloubkou do 5 cm, nebo hladké betonové plochy kryté akusticky polopropustným, převážně odrazivým materiálem (žaluzie, mříže).

#### *Nízká rozptýlnost*

Jednotlivé oddělené panely, hladké zakřivené povrchy, ploché hladké plochy, jemné děrované mříže, pletivo, vysoce pohltivé materiály.

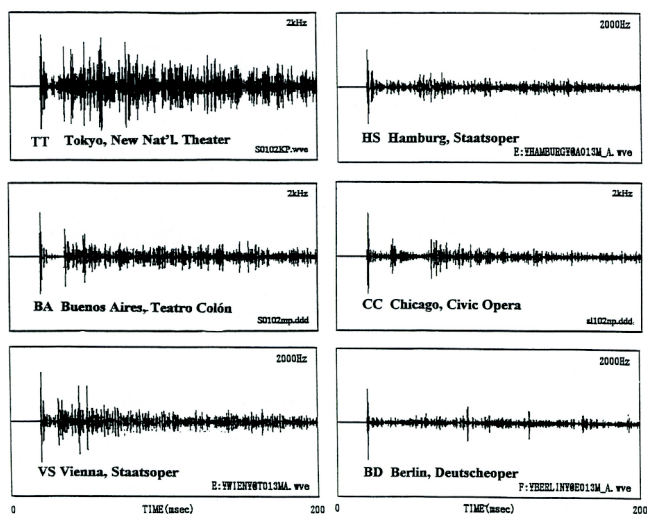
Každému stupni rozptýlnosti přiřadili autoři číselný váhový koeficient: „vysoce rozptýlné“ = 1, „středně rozptýlné“ = 0,5, „nízká rozptýlnost“ = 0. Váženy jsou potom rozptýlné vlastnosti všech dílčích ploch mimo zadní stěnu sálu. Má-li například strop o celkové ploše 3200 m<sup>2</sup> hladké plochy 1000 m<sup>2</sup> a zbytek je hluboce kazetován, potom má  $1000 \cdot 0 + 2200 \cdot 1 = 2200$  bodů. Toto číslo je přičteno k bodové hodnotě bočních stěn. Zadní stěna je zanedbána. Rozptýlnost povrchu sálu je podíl celkové bodové hodnoty a celkové plochy stropu a bočních stěn.

Hodnoty rozptylnosti povrchu úzce korelují se stupněm difuze zvukového pole. Proto mohou být jeho mírou. Tuto míru Beranek nazývá *SDI*.

Ze všech uváděných sálů v [8] má nejvyšší hodnotu míry rozptylnosti Grosser Musikvereissaal ve Vídni,  $SDI = 0,96$ , považovaný za jeden ze tří nejlepších sálů světa, nejnižší London Barbican Hall s  $SDI = 0,23$ .

## Textura

Hidaka [8], [9], [10]. Texturu popisuje Beranek jako „subjektivní vjem, jaký působí jednotlivé odrazy po příchodu přímého zvuku k uchu posluchače. Ve výtečných sálech jsou tyto odrazy, přicházející brzy za přímým zvukem, časově rozloženy téměř rovnoměrně. V některých halách se vyskytuje značný interval mezi prvním a dalšími odrazy. Dobrá textura vyžaduje značný počet časných odrazů, rovnoměrně, ne však přesně stejně vzájemně vzdálených, z nichž žádný nesmí převládat nad ostatními“. Neoddělitelnou součástí je počáteční prodleva *ITDG*. Metoda hodnocení nebyla do roku 2002 definována. Vyhodnocovala se počáteční část impulsové odezvy porovnáním „od oka“ se známými impulsovémi odezvami vysoce hodnocených sálů.



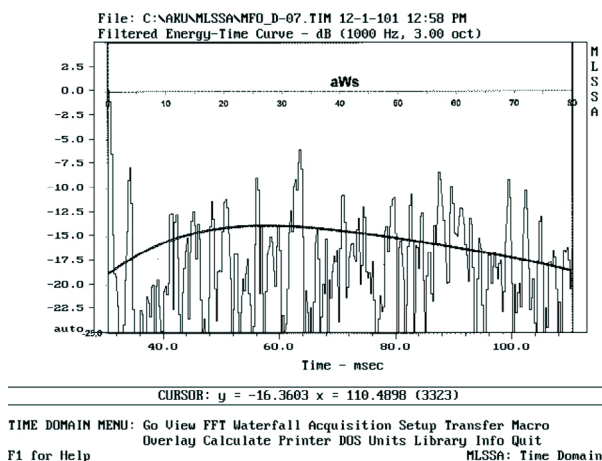
Obrázek 6: Prvých 200 ms tří nejlépe hodnocených (vlevo) a „nejméně dobrých“ (vpravo) impulsových odezvy z měření 22 operních sálů. Ostatní jsou „někde mezi“ [9]

Podle Beranka má textura velmi silný vliv na subjektivní hodnocení sálů. V [9] lituje, že dosud nebylo kritérium „Textura“ kvantifikováno.

Pokusů o kvantifikaci byla v posledních letech celá řada, žádná metoda však nebyla dostatečně citlivá, aby přesně rozlišila texturu impulsové odezvy do více kategorií. Nejnadějněji vychází definice „Parametr textury“ [10].

Energetická obalová křivka impulsové odezvy filtrovaná šířkou pásma 3 oktáv se středním kmitočtem 1 kHz je porovnávána se Schubertovou křivkou prahu absolutní poznatelnosti jediného odrazu v závislosti na čase (*aWs*) [11].

Parametr textury je počet špiček přesahujících *aWs*. Hodnocen je počet přesahujících špiček. U vynikajících sálů je tento počet 20 až 30. Současně je přezkoumáváno i kritérium *ITDG* – a *aWs*. Jedna z teorií tvrdí, že *ITDG* by se mělo vyhodnocovat z *aWs* a jeho hodnota je dána časem prvního odrazu „nad Schubertem“.



Obrázek 7: Parametr textury podle Hidaky, definovaný pomocí obalové křivky a *aWs*. Parametr textury = 27

## Akustická podpora pódia *ST* (Stage Support Factor)

Akustická podpora pódia *ST* je definována jako poměr energií zvuku v intervalech 0 až 10 ms a 20 až 100 ms, vyjádřený v logaritmickém měřítku. Charakterizuje vzájemný přenos zvuku mezi hudebníky. Je určována z kvadrátu časového průběhu akustického tlaku  $p^2(t)$  monaurální impulsové odezvy  $p(t)$  snímané všesměrovým mikrofonom ve vzdálenosti 1 m od všesměrového zdroje jako

$$ST = 10 \log \frac{\int_{t_2}^{t_1} p^2(t) dt}{\int_0^{t_3} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{t_1} - E_{t_2}}{E_{t_3}}. \quad (22)$$

Rozlišujeme:

$ST_{\text{early}}$  (early support),  $t_1=100$  ms,  $t_2=20$  ms,  $t_3=10$  ms,  
 $ST_{\text{late}}$  (late support),  $t_1=1000$  ms,  $t_2=100$  ms,  $t_3=10$  ms,  
 $ST_{\text{total}}$  (total support),  $t_1=1000$  ms,  $t_2=20$  ms,  $t_3=10$  ms.

Optimální hodnoty  $ST_{\text{early}}$  leží v rozmezí  $-12 \pm 2$  dB.

## 3. Systém klasifikace akustických poměrů

Ucelený použitelný systém jednočíselné klasifikace akustických poměrů na základě vyhodnocení dílčích kritérií uvedených v předešlé kapitole dosud neexistuje.

| $i$ | atribut                     | kritérium   | váhový koeficient $a_i$                                                                                | $x_i$                          | preferovaná hodnota                                                      |
|-----|-----------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1   | prostorovost                | $IACC_{E3}$ | 1,2                                                                                                    | $1 - IACC_{E3}$                | *                                                                        |
| 2   | intimita                    | $ITDG$      | 1,42                                                                                                   | $\log(ITDG/ITDG_{pref.})$      | 20 ms nebo méně                                                          |
| 3   | hlasitost                   | $G_{mid}$   | 0,04 pro $G_{mid} < 4,0$<br>0,07 pro $G_{mid} > 5,5$                                                   | $G_{mid} - G_{mid,pref.}$ [dB] | $4 \div 5,5$                                                             |
| 4   | doznívání                   | $EDT$       | 9 pro $EDT < 2,0$<br>12 pro $EDT > 2,3$                                                                | $\log(EDT/EDT_{pref.})$        | $2 \div 2,3$                                                             |
| 5   | spektrální průběh doznívání | $BR$        | 10 pro $BR < 1,1$<br>10 pro $BR > 1,25$<br>a $T_{60} > 2,3$<br>100 pro $BR > 1,45$<br>a $T_{60} < 1,8$ | $\log(BR/BR_{pref.})$          | $1,1 \div 1,25$ pro $T_{60} = 2,2$<br>$1,1 \div 1,45$ pro $T_{60} = 1,8$ |
| 6   | difuzita zvukového pole     | $SDI$       | 1                                                                                                      | $\log(SDI/SDI_{pref.})$        | 1,0                                                                      |

\* Pro  $IACC_{E3}$  neexistuje preferovaná hodnota.  $IACC_{E3}$  má být co nejnižší. Nejnižší hodnoty  $IACC_{E3}$  v excelentních sálech jsou okolo 0,3.

V současné době existují nejméně tři použitelné modely jednočíselné predikce subjektivní kvality sálů na základě jejich objektivně měřitelných parametrů:

- Shuo-xian Wu (1991), používající matici hodnot  $EDT$ ,  $LE$  (nebo  $IACC$ ), derivaci  $\partial EDT/\partial f$  a rozptyl  $LE$  (nebo  $IACC$ ) v sále pro prázdný a plně obsazený sál [12],
- Beranek (1996), systémem ortogonálních parametrů  $[1-IACC_{E3}]$ ,  $ITDG$ ,  $G_{mid}$ ,  $EDT$ ,  $BR$  a  $SDI$  [8],
- Ando (1997), na základě  $IACC$ ,  $ITDG$ ,  $Listening Level LL$  a subjektivní doby dozvuku  $SRT$  [13].

Právě Berankův model je nyní široce používán při úpravách sálů, kdy na základě měřitelných hodnot jsou hledány a napravovány jeho největší slabiny. Tento predikční model je popsán v následující samostatné kapitole.

### 3.1. Jednočíselná klasifikace akustické kvality sálů

Na základě pokusů v syntetickém poli objevil Ando, že pomocí párového srovnávání subjektivních preferencí lze seřadit koncertní sály na stupnici (škálovat). V době publikace měla řada akustiků nedůvěru k tak jednoduchému vzorci, získanému navíc napodobováním jednotlivých jevů v bezdozvukové komoře.

Ando předpokládal  $n$  fyzikálně měřitelných ortogonálních (neovlivňujících se navzájem) atributů popisujících všechny signály dopadající na obě uši posluchačů. Těchto  $n$  atributů tvoří  $N$ -rozměrný prostor se souřadnicemi  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Škálová hodnota jednorozměrné subjektivní odpovědi je potom funkcí těchto souřadnic

$$S = g(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (23)$$

Psychoakustické studie potvrdily, že pro celkové subjektivní hodnocení platí

$$S = \sum g(x_i) = \sum S_i, \quad (24)$$

kde  $S_i$  jsou subjektivní preference jednotlivých parametrů zvukového pole. Tato rovnice je analogická k principu superpozice u lineárních elektronických systémů.

Ando dále předpokládal, že nejvhodnější bude, když pro optimální hodnoty bude hodnota každé subjektivní preference rovna 0, tedy  $[g(x_i)]_{pref} = 0$ , kde  $i = 1, 2, \dots, n$ , a tedy  $S_{max} = 0$ . To ovšem vyžaduje všechny atributy vyjadřovat v logaritmických souřadnicích. Pro jednotlivé subjektivní preference potom platí

$$S_i = -a_i \sqrt{|x_i|^3}, \quad (25)$$

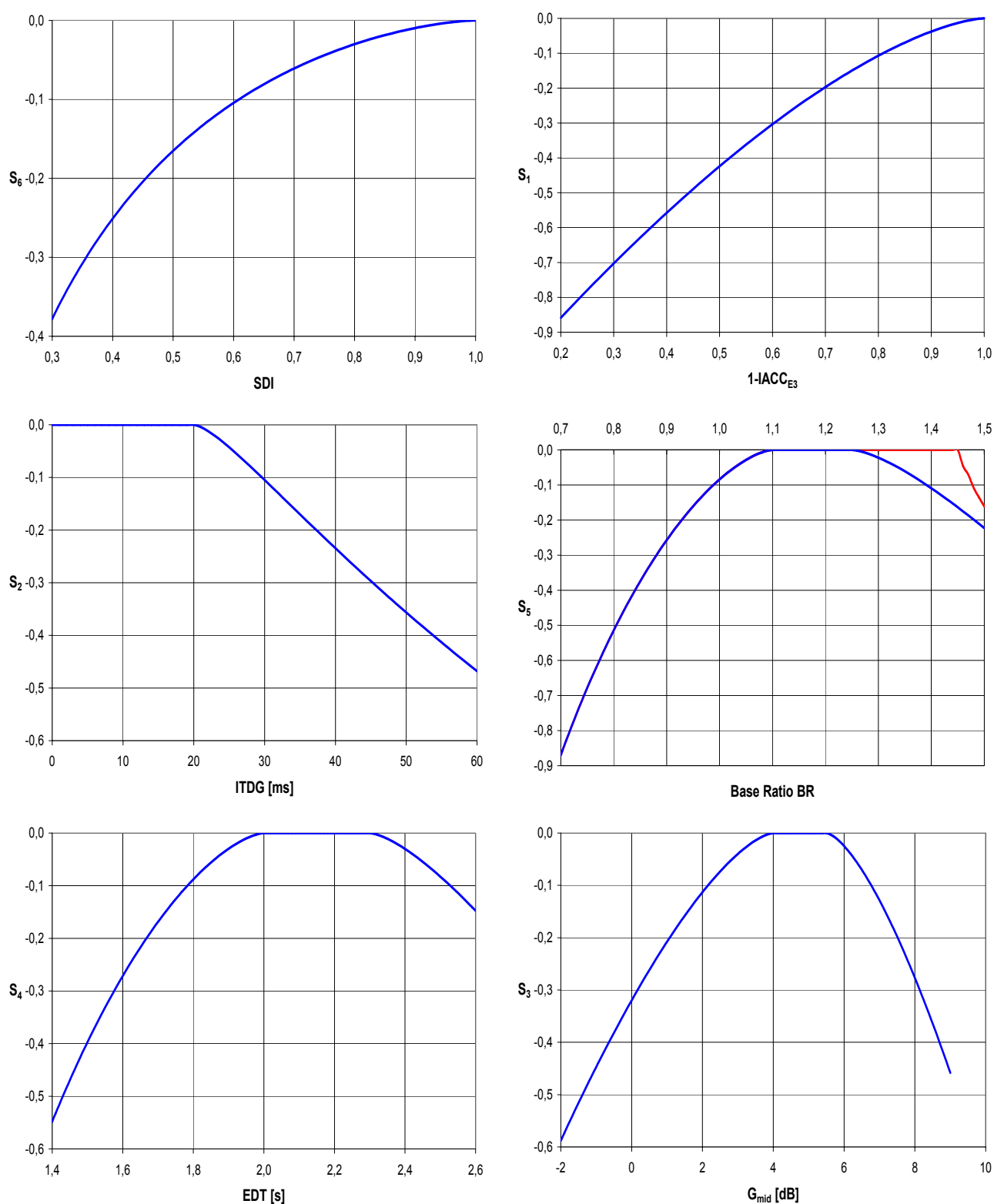
kde  $a_i$  jsou váhové koeficienty jednotlivých atributů a  $x_i$  hodnoty příslušného kritéria pro konkrétní parametry<sup>3</sup>.

Za nezávislé atributy, dostačující k celkovému popisu, Ando považoval prostorovost, intimitu, hlasitost a doznívání.

Na Andovy práce navázal Beranek. Porovnával stovky odpovědí z dotazníků od dirigentů, sólistů, hudebních kritiků, z mnoha desítek sálů s objektivními, fyzikálně měřitelnými parametry. Analýzou těchto dat získal šest parametrů, které v testech korelace byly ortogonální. Čtyři z nich byly shodné s Andem, další dva jsou spektrální závislost doznívání a difuzita doznívajícího zvukového pole. Podle subjektivních hodnocení Beranek uvádí 6 kategorií sálů (rank):

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| „Superior“ – „špičkové“             | A+ |
| „Excellent“ – „výborné“             | A  |
| „Good to Excellent“ – „velmi dobré“ | B+ |
| „Good“ – „dobré“                    | B  |
| „Fair to Good“ – „přijatelné-dobré“ | C+ |
| „Fair“ – „přijatelné“               | C  |

<sup>3</sup>Zde je častá nejednotnost výkladu jednotlivých pojmů. Atribut je základní vlastnost – zvukové pole uzavřeného prostoru doznívá. Kritérium je některá z definic či metod měření této vlastnosti – doba dozvuku  $T_{60}$ ,  $EDT$ ,  $Running Reverberation$ . Parametr zvukového pole je konkrétní hodnota kritéria – doba dozvuku  $T_{60} = 1,2$  s.



Obrázek 8: Váhovací funkce parametrů

Pro celkovou subjektivní preferenci akustického prostředí (jinými slovy kvalitu akustiky koncertního sálu) potom platí součet

$$S = \sum S_i = \sum -a_i \sqrt{|x_i|^3}. \quad (26)$$

Beranek dále identifikoval jednotlivé atributy s objektivními kritérii, jejich váhové koeficienty a rozmezí optimálních hodnot (v grafické podobě viz obrázek 8).

Pro predikci subjektivně hodnocené akustické kvality koncertního sálu platí následující meze (s pravděpodobností 95 %):

| Objektivní rating sálu | Subjektivní rank |
|------------------------|------------------|
| $-0,3 < S < 0,0$       | A+               |
| $-0,6 < S < -0,3$      | A                |
| $-0,9 < S < -0,6$      | B+               |
| $-1,2 < S < -0,9$      | B                |
| $S < -1,2$             | C                |

#### 4. Závěr

Tento článek má za úkol shrnout měřitelné parametry sálů a popis jejich jednočíslné klasifikace. Ve svém výčtu objektivních parametrů se snaží postihnout hlavní měřené parametry a stanovení jejich konkrétních mezí. V kapitole 3 je popsán systém jednočíslné klasifikace kvality sálů podle Berankova modelu, který má dle názoru autora největší vypovídací hodnotu a velmi dobře koresponduje se změřenými hodnotami a subjektivním hodnocením v mnoha sálech světa.

#### Reference

- [1] Reichardt, W.: *Grundlagen der technischen Akustik*, 1968, Akademische Verlagsgesellschaft Geest Portig K.-G., Leipzig.
- [2] Hoehne, R., Schroth, G.: Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersalen, *Acustica* 81, 1995, pp. 309–319.
- [3] Bradley, J., S., Reich, R., D., Norcross, S., G.: On the combined effects of early- and late-arriving sound on spatial impression in concert halls, *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(2), August, 2000.
- [4] Hidaka, T., Beranek, L., L., Okano, T.: Interaural Cross-correlation, Lateral Fraction, and Low- and High-frequency Sound Levels as Measures of Acoustical Quality in Concert Halls, *J. Acoust. Soc. Am.*, 98(2), August, 1995, pp. 988–1007.
- [5] Okano, T., Beranek, L., L., Hidaka, T.: Relations among interaural cross-correlation coefficient ( $IACC_E$ ), lateral fraction ( $LF_E$ ), and apparent source width (ASW) in concert halls, *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(1), July, 1998, pp. 255–265.
- [6] Haas, H.: Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache, *Acustica* (1), 1951, č. 2, str. 49–58.
- [7] Dietsch, L.: Objektive raumakustische Kriterien zur Erfassung von Echostörungen und Lautstärken bei Sprach und Musikdarbietungen, *Dissertation*, Technische Universität Dresden, 1983.
- [8] Beranek, L., L.: *Concert and Opera Halls – How They Sound*, Acoustical Society of America, 1996, ISBN 1-56396-530-5.
- [9] Hidaka, T., Beranek, L., L.: Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americas, *J. Acoust. Soc. Am.*, 107(1), January, 2000, pp. 368–383.
- [10] Hidaka, T.: On the objective parameter of texture. *Forum Acusticum & Internoise 2002*, Sevilla.
- [11] Schubert, P.: Die Wahrnehmbarkeit von Rückwürfen bei Musik, *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik*, Band 78, Heft 6, Dezember 1969, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig.
- [12] Wu, S.-x.: Applying fuzzy set theory to the evaluation of concert halls. *J. Acoust. Soc. Am.* 89(2), February, 1991.
- [13] Ando, Y., Singh, P., K.: *Global subjective evaluation for design of sound fields and subjective preference for seat selection*, In: Ando, Y., Nossong, D.: *Music and Concert Hall Acoustics*, Academic Press, 1997.
- [14] [14] ČSN 73 0525, Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady, 1998.



---

Akustické listy: ročník 11, číslo 3      září 2005

ISSN: 1212-4702

Vydavatel: Česká akustická společnost, Technická 2, 166 27 Praha 6

Vytisklo: Ediční středisko ČVUT

Počet stran: 20

Počet výtisků: 200

Redakční rada: M. Brothánek, O. Jiříček, J. Kozák, R. Čmejla, F. Kadlec, J. Štěpánek, P. Urban, J. Burčík

Jazyková úprava: R. Štěchová

© ČsAS

Uzávěrka příštího čísla Akustických listů je 25. listopadu 2005.

NEPRODEJNÉ!