

PARAMETRE PSYCHOAKUSTIKY

Zdenka DŽOGANOVÁ - Lenka SELECKÁ

PARAMATERTS OF PSYCHOACOUSTICS

Abstrakt

Tento článok pojednáva o základných parametroch sledovaných v psychoakustických meraniach. Psychoakustika je v súčasnosti vedná disciplína, o ktorú je vysoký záujem. Prostredníctvom psychoakustických parametrov, ktoré je možné analyzovať a vyhodnotiť je možné následne ovplyvňovať psychickú pohodu človeka upravením týchto parametrov u rozličných strojárskych produktov. Množstvo výskumníkov uvádza rozličné psychoakustické parametre, pričom tento článok konkrétne pojednáva o hlasitosti zvuku, ostrosti zvuku, drsnosti zvuku, tónovosti zvuku, subjektívnej dobe trvania zvuku, farbe zvuku, výške zvuku, sile kolísania zvuku, senzorickej príjemnosti a objektívnom kritériu.

KLúčové slová: psychoakustický parameter, psychická pohoda, zvuk.

Abstract

This article deals about fundamental parameters of psychoacoustics measurements. Nowadays, psychoacoustics is scientific discipline by which the high interest. By analysis and evaluation psychoacoustics parameters there is possible to affect mental well being of human, by adjusting of these parameters of various engineering products. Many researchers deals with various psychoacoustics parameters, but this article deals about loudness of sound, sharpness of sound, roughness of sound, tonality, subjective time of duration, timbre, height of sound, fluctuation strength of sound, sensory pleasantness and objective criteria.

Key words: psychoacoustics parameters, mental well being, sound.

ÚVOD

Termín psychoakustika zahŕňa popis a modelovanie ľudského sluchu. Funkcie psychoakustického modelu skúšajú extrahovať charakteristické dáta príbuzné špecifickým sluchovým rozmerom ako sú hlasitosť, ostrosť, impulzivnosť alebo priestrannosť z fyzikálnych dát ako je akustický tlak, časové funkcie alebo spektrum. Tieto rozmery sú jasnými fyzikálnymi deskriptormi, ktoré ako súbor formujú charakter zvuku. Je veľmi dôležité vziať do úvahy kontext zvukového deja ako aj referencie pre jeho posúdenie. [1], [2], [3]

PSYCHOAKUSTICKÉ CHARAKTERISTIKY

Podnety s určitými charakteristikami budú viesť k špecifickým dojmom. Modely počutia, ktoré zahŕňajú stimuláciu vlasových buniek a spätnú väzbu popisujú niektoré aspekty spracovania vonkajšieho zvuku a charakteru zvuku. Môžu byť použité pre rozvoj súboru parametrov nad rámec čisto fyzikálnej hladiny zvuku v decibeloch. [4], [5]

K základným parametrom sledovaným v psychoakustike ako vednej disciplíne patrí hlasitosť, výška, ostrosť, drsnosť, tónovosť, farba, senzorickej príjemnosť, sila kolísania, subjektívna doba trvania a objektívne kritérium.

1 Výška zvuku

Vlastnosť zvukového vnímania, ktorá umožňuje zoradiť zvuky na stupnici od hlbokých po vysoké sa nazýva výška zvuku. Jednotkou výšky zvuku je *mel*. Rozlišujú sa dve stupnice výšky zvuku:

- stupnica podľa Stevensa, kde čistému tónu o frekvencii 1000 Hz a hladine akustického tlaku 40 dB zodpovedá 100 melov;
- stupnica podľa Zwickera, kde je výška zvuku vyjadrená vzťahom:

$$m = 2595 \log\left(\frac{f}{700} + 1\right) = 1127 \ln\left(\frac{f}{700} + 1\right), \quad (1)$$

kde je možné vidieť, že výška zvuku je závislá od frekvencie. Avšak experimentálne bolo dokázané, že výška zvuku je závislá aj od hladiny akustického tlaku podľa vzťahu:

$$v = \frac{f_{40dB} - f_L}{f_L} 100\% \quad (2)$$

Harmonický zložený tón je považovaný za súčet niekoľkých sínusových tónov, ktorých kmitočty sú rôznymi celočíselnými násobkami základného kmitočtu. Ľudský sluchový orgán pripisuje harmonickému zloženému tónu jediná výšku, ktorá je približne rovnaká ako výška jeho základného kmitočtu. Preto pri počúvaní harmonických zložených tónov nevnímame výšky ich harmonických zložiek oddelene, ale všetky nám splyávajú do jediného vnemu výšky. [6]

Na základe experimentov bolo dokázané, že harmonický zložený tón so základným kmitočtom $f_z \geq 1000$ Hz má približne rovnakú výšku ako čistý tón s rovnakým kmitočtom f_z , zatiaľ čo harmonický zložený tón so základným kmitočtom $f_z \leq 1000$ Hz má o trochu nižšiu výšku ako čistý tón s rovnakým kmitočtom f_z . [7]

Rovnako ako v prípade čistého tónu tak aj výška harmonického zloženého tónu je závislá na hladine akustického tlaku. Vnemu výšky je u človeka vyvolaný nielen čistým či harmonickým zloženým tónom, ale aj pásmovým šumom. Vnemu výšky pásmového šumu korešponduje pri väčšej šírke pásma s jednou alebo oboma hodnotami dolného a horného medzného kmitočtu pásma, pri veľmi úzkych pásmach naopak korešponduje so stredným kmitočtom pásma. [4], [7]

2 Hlasitosť zvuku

Hlasitosť ako jeden zo základných parametrov sluchového vnemu predstavuje mieru vnímania vplyvu energetického obsahu zvukového vlnenia na ľudské ucho. Je to parameter, u ktorého je možné usporiadať zvuky na stupnici v rozsahu od tichých po hlasné. [6]

Hlasitosť čistého tónu závisí od veľkosti akustického tlaku, frekvencie a doby trvania tohto tónu. Hladina hlasitosti zvuku, vyjadrená v jednotkách fon je číselne rovná hladine akustického tlaku referenčného zvuku v dB, ktorý je tvorený čelne dopadajúcou sínusovou rovinou postupnej vlny s kmitočtom 1 kHz, ktorej hlasitosť sa rovná hlasitosti daného zvuku. Hladina akustického tlaku sa meria binaurálne bez prítomnosti pokusnej osoby v mieste predpokladaného ťažiska jej hlavy. Hladinu hlasitosti definuje vzťah:

$$L_N = L_{1000} = \frac{20 \log p_{1000}}{p_0} \quad (3)$$

kde: L_N – hladina hlasitosti [fon],
 L_{1000} – hladina akustického tlaku [dB],
 p_{1000} – akustický tlak čistého tónu s kmitočtom 1 kHz [Pa],
 p_0 – referenčný akustický tlak 20 μPa

Hladina hlasitosti sa dá zistiť pre ľubovoľný zvuk. Najnižšia krivka rovnakej hladiny hlasitosti je prah počutia, ktorému odpovedá hodnota približne 3 fony.

Psychoakustická veličina hlasitosť N bola stanovená subjektívnym meraním na pomerovej škále a je udávaná v jednotkách son. Staršou jednotkou používanou v tomto smere je „phon“. Pre čistý tón o frekvencii 1 kHz je hodnota decibelu identická k hodnote fonu. [1], [7]

Hlasitosťou čistého tónu prichádzajúceho čelne ako rovinná vlna s frekvenciou 1 kHz a hladinou akustického tlaku 40 dB pri referenčnom akustickom tlaku 20 μPa je definovaný jeden son.

3 Subjektívna doba trvania zvuku

Ľudský sluchový systém je schopný kvantitatívne posúdiť objektívnu dobu trvania zvukového signálu ako aj pauzy medzi jednotlivými zvukovými signálmi merané v časových jednotkách. Výsledkom subjektívneho posúdenia skutočnej doby trvania zvukového signálu prostredníctvom pokusnej osoby je *subjektívna doba trvania*, ktorá sa môže líšiť od skutočnej objektívnej doby trvania. Táto veličina je označovaná písmenom D v jednotkách *dura*. Jedna dura predstavuje vnímanú dobu trvania čistého tónu s frekvenciou 1 kHz a hladinou akustického tlaku 60 dB, ktorého objektívna doba trvania je 1 s. [7]

4 Farba zvuku

Schopnosť sluchového vnímania umožňujúca poslucháčovi rozlíšiť dva neidentické zvuky s rovnakou hlasitosťou a rovnakou výškou je *farba zvuku*. Prostredníctvom vnemu farby zvuku predovšetkým pri zloženom zvuku dokáže človek rozlíšiť napríklad zvuky rôznych hudobných nástrojov, hlasy rôznych osôb, zvuky áut rôznych značiek.

Tvrdenia ohľadom farby zvuku, ktoré potvrdzuje doterajší výskum:

- farba zvuku je dôležitá veličina pri subjektívnom posudzovaní vnímania zvukovej kvality zariadení pre reprodukciu zvukových nahrávok,
- farba zvuku je dôležitá zložka vnemu, akustickej kvality priestorov, najmä koncertných a divadelných sál,
- farba zvuku je jedným z najdôležitejších aspektov vnímania zvukovej kvality,
- farba zvuku je viacdimeziálna percepčná veličina,
- k popisu farby zvuku postačujú najviac štyri elementárne percepčné dimenzie zo súboru: ostrosť, objem (plnosť), drsnosť (hustota alebo kompaktnosť) a jasnosť. [4], [7]

5 Ostrosť zvuku

Pocit *ostroti* je významný subjektívny dojem a nezávislý rozmer charakteru zvuku. Je určený predovšetkým rovnováhou medzi nízkymi a vysokými spektrálnymi komponentmi a vzrastá, keď je prítomných viac vysoko-frekvenčných komponentov. Úzkopásmový zvuk v kritickom pásme 1 kHz v hladine akustického tlaku 60 dB slúži ako referencia. Tento zvukový dej bude produkovať ostrosť 1 acum. Ostrosť ľubovoľných signálov sa získa výpočtom druhu centra závažnosti konkrétnej hlasitosti. [1]

$$S = 0,11 \frac{\int_0^{24 \text{Bark}} N' g(z) z dz}{\int_0^{24 \text{Bark}} N' dz} \quad (4)$$

kde: S - ostrosť [acum]
 N' - konkrétna hlasitosť v Barkovej stupnici
 $g(z)$ - váhový faktor [1]

6 Sila kolísania zvuku

Pomalé modulácie amplitúdy spôsobujú vnímanie *kolísania*. Aby boli identifikované ako modulácia čisto vnímateľného stabilného zvuku, kolísanie by nemalo byť rýchlejšie ako 20 Hz. Modulácie vyššie ako 20 Hz vytvoria pocit drsnosti. V približne 4 Hz má ucho najvyššiu citlivosť na modulácie amplitúdy. Teda referenčný signál sily kolísania je čistý tón o frekvencii 1 kHz a hladine akustického tlaku 60 dB s moduláciou amplitúdy 100% pri 4 Hz. Toto prislúcha sile kolísania 1 vacil podľa nasledujúcej rovnice:

$$F = \frac{0,008 \int_0^{24 \text{Bark}} \left(\frac{\Delta L}{dB}\right) / \text{Bark} dz}{\left(\frac{f_{mod}}{4 \text{Hz}}\right) + \left(\frac{4 \text{Hz}}{f_{mod}}\right)} \quad (5)$$

kde: F - sila kolísania [vacil]

ΔL - spektrálny maskovací vzor ohodnotený z časového vývoja maskovacej krivky [1]

Sila kolísania závisí od troch parametrov:

- modulačnej frekvencie f_{mod} [Hz],
- hĺbky amplitúdovej modulácie [dB],
- hladiny akustického tlaku [dB]. [7]

7 Drsnosť zvuku

Rýchle modulácie amplitúdy nemôžu byť vnímané ako kolísania. Napriek tomu, tento efekt je lepšie popísaný pocitom *drsnosti*. Drsnosť je významný efekt jasne oddelený od iných psychoakustických efektov. Vyžaduje rýchle modulácie amplitúdy (15 Hz až 300 Hz). Referenčný signál je 1 kHz čistého tónu a hladiny 60 dB modulovaného na 70 Hz pri 100%. Tento podnet prislúcha 1 aperu. [1], [8]

Drsnosť zvuku je funkciou troch parametrov:

- modulačnej frekvencie f_{mod} [Hz],
- stupňa amplitúdovej modulácie [%],
- hladiny akustického tlaku [dB]. [7]
- Drsnosť zvuku je všeobecne definovaná vzťahom:

$$R = 0,3 f_{mod} \int_0^{24 \text{bark}} \Delta L(z) dz, \quad (6)$$

kde: f_{mod} - modulačná frekvencia [Hz],

ΔL - hĺbka časového maskovania v z-tom barkovom pásme. [7]

8 Tónovanie, výška tónu a rozstup sily

Zvuky majú často *tónový charakter*. V spektrálnom zastúpení obsahujú diskkrétne komponenty, ktoré prislúchajú periodicite v časovej oblasti. Príkladmi periodických signálov sú samohlásky a technické zvuky zo strojov s rotujúcim spracovaním.

Tónové komponenty sú rozpoznávané okamžite. Ľudský sluchový systém oddeľuje tónové komponenty od súboru zmiešaných zvukov s obrovskou účinnosťou. Pozornosť ľudí pri počúvaní súbor zvukov je nasmerovaná smerom k tónovým komponentom. Tónovanie môže byť popísané pomerom dôležitosti alebo spektrálnou hladinou rozdielu medzi tónovými a širokopásmovými komponentmi. Tónový charakter zistený z hladiny rozdielu medzi príslušnými frekvenčnými pásmami v spektre je zvýraznený pridaním konštantnej tónovej penalty až do 6 dB závisiac od typu zvuku.

Výška tónu je subjektívne získané množstvo, ktoré je mimoriadne náročné charakterizovať vo všeobecnosti. Je jednoducho pochopené pri porovnávaní výšky tónu. Pri výške 1 kHz čistého tónu sa očakáva, že bude jasne definované, teda silné. Ostatné zvuky ako úzkopásmový hluč alebo vysokopásmový hluč limitovaný 1 kHz, majú určitý tónový charakter, ale nie tú istú silu ako čistý tón. Je mátať, že tieto spomínané zvuky nie sú vôbec periodické. Je preto nevyhnutné študovať vnímanie výšky tónu použitím modelov neurónového spracovania, spektrálne zlučenie komplexných tónov, formovanie spektrálnych oblastí vysokej odpovede v slimákoví, vplyvy trvania signálu, ich fázy a oveľa viac faktorov.

Parameter *rozstup sily* môže byť experimentálne vyjadrený použitím veľkostnej stupnice. Rozstup sily môže byť modelovaný modelom frekvenčnej transformácie okrajového sluchového orgánu (slimák) a hodnotením výsledkov maximálnej spektrálnej amplitúdy (výška) a jej zmien (rozstup sily). [1]

9 Senzorická príjemnosť

Senzorická príjemnosť je komplexná psychoakustická veličina, ktorá predstavuje kombináciu štyroch základných psychoakustických veličín:

- hlasitosť [son],
- ostrosť [acum],
- drsnosť [asper],
- tónovosť. [6], [7]

Senzorická príjemnosť závisí predovšetkým od ostrosti. Klesá s rastúcou ostrosťou a drsnosťou a rastie s rastúcou relatívnou tónovosťou. Podľa Zwicker a Fastla je senzorická príjemnosť vnímaná pokusnou osobou s priemernými vlastnosťami ľudského sluchu a je daná vzťahom:

$$P = e^{-0,7R} e^{-1,08S} (1,24 - e^{-2,43T}) e^{(-0,023N)^2} \quad (7)$$

kde: R - drsnosť,

S - ostrosť,

T - tónovosť,

N - hlasitosť. [9]

10 Objektívne kritérium

Nakoľko by bolo veľmi náročnou úlohou posudzovať určitý zvuk podľa všetkých vymenovaných psychoakustických parametrov, zaviedla sa veličina *objektívne kritérium* na posúdenie informačného obsahu zvukového signálu a jeho základnej vnemovej kvality. Táto veličina sa označuje symbolom *UBA* a vypočíta sa empirickým vzťahom:

$$UBA = dN^{1,3} \left\{ 1 + 0,25(S - 1) \log(N + 10) + 0,3F \left(\frac{1 + N}{N + 0,3} \right) \right\}, \quad (8)$$

kde: d - koeficient pre čas:

d=1 pre denný čas od 06:00 do 22:00

$d = 1 + \left(\frac{N}{5} \right)^{0,3}$ pre nočný čas od 22:00 do 06:00

Tento koeficient nezohľadňuje súčasné rozdelenie dňa na deň (06:00-18:00) a na noc (22:00-06:00). [6]

ZÁVER

Aby sa človek dokázal brániť všetkým negatívnym vplyvom zvuku, musí vedieť zvuk kvantifikovať na základe bežných fyzikálnych parametrov akými sú hladina akustickej intenzity, hladina akustického tlaku či hladina akustického výkonu alebo na základe psychoakustických parametrov. Z inžinierskeho hľadiska by bolo možné konštatovať, že tieto parametre by mohli byť menej „dôveryhodné“, nakoľko sú subjektívneho charakteru, avšak ich existencia bola dokázaná experimentom. Ďalej je potrebné poznamenať, že psychoakustické parametre zohrávajú veľmi dôležitú a významnú úlohu pre človeka, nakoľko priamo ovplyvňujú jeho sluchové vnemy.

Psychoakustika ako vedná disciplína identifikuje, kvantifikuje a skúma vplyvy jednotlivých psychoakustických parametrov na celkový sluchový vnem človeka, na reťaz jeho psychických reakcií na zvukový podnet a tým pomáha vymodelovať zvukový dizajn výrobkov tak, aby vyhovoval vlastnostiam psychoakustických parametrov väčšine cieľovej skupiny spotrebiteľov.

Podakovanie

Tento príspevok vznikol v rámci projektu 049TUKE-4/2012.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] Vorländer, M.: Auralization: Fundamentals of Acoustic, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Leipzig: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 335 p. ISBN 978-3-540-48829-3.
- [2] Bodden, M.: Psychoacoustics and industry: Instrumentation versus experience. *Acustica/acta acustica* 85, 1999, 604-607
- [3] Džuka, J.: Základy psychometrie a teórie testov. Prešov. Prešovská univerzita v Prešove, 2006. 103 s. ISBN 80-8068-527-4.
- [4] Fastl, H. – Zwicker, E.: Psychoacoustics. Facts and models. Third edition. Springer, Berlin, 2006. 474 p. ISBN 978-3-540-23159-2.
- [5] Gabriellsson, A. – Rosenberg, U. – Sjögren, H.: Judgements and dimension analyses of perceived sound quality of sound – reproducing systems. *J. Acoust. Soc. Amer.* 55, 1974, 854-861.
- [6] Lumnitzer, E. – Badida, M. – Polačeková, J.: Akustika. Základy psychoakustiky. TUKE, SjF, KE, 2012. 114 s. ISBN 978-80-8086-172-8.
- [7] Melka, A.: Základy experimentální psychoakustiky. Praha: ERMAT Praha, 2005. 327 s. ISBN 80-7331-043-0.
- [8] Havelock, D. – Kuwano, S. – Vorländer, M.: Handbook of Signal Processing in Acoustics. Volume 1. Springer, New York. 2008. 927 p. ISBN 978-0-387-77698-9.
- [9] Zwicker, E. – Fastl, H.: On the development of the critical band. *J. Acoust. Soc. Amer.* 52, 1972, 699-702.

ADRESY AUTOROV

Ing. Zdenka DŽOGANOVÁ, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky, Park Komenského 5, 042 00 Košice, tel.: +421 55 602 2927, e-mail: zdenka.dzoganova@tuke.sk

Ing. Lenka SELECKÁ, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky, Park Komenského 5, 042 00 Košice

RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.