

Objektivizácia tónového hluku v mimopracovnom prostredí

Milan Drahoš, Ing.,
D2R engineering, s.r.o., Poprad
www.d2r.sk

1. Úvod

Za tónový hluk sa podľa § 2 písm. x) vyhlášky MZ SR č. 549/2007 Z.z. považuje zvuk, ktorému možno subjektívne prisúdiť výšku, tónová zložka je počuteľná a pôsobí rušivo. Ďalej sa uvádza, že prítomnosť tónovej zložky vo frekvenčnom spektre zvuku sa preukazuje tretinooktávovou frekvenčnou analýzou tak, že hladina akustického tlaku v pásme s tónovou zložkou prevyšuje hladiny v susediacich pásmach o viac ako 5 dB. Za hladinu v jednom pásme s tónovou zložkou je možné považovať aj dve susediace pásma s rozdielom ich hladín najviac o 3 dB. V niektorých prípadoch je potrebné použiť analýzu pomocou užších frekvenčných pásiem.

Podľa normy STN ISO 1996-1:2006, tónový zvuk je zvuk charakterizovaný jednou frekvenčnou zložkou alebo zložkami úzkeho pásma, ktorý sa počuteľne vyníma z výsledného hluku. Objektívne metódy posúdenia počuteľnosti tónových zložiek sú uvedené v norme STN ISO 1996-2:2008 (Príloha C a D).

Preukázaná prítomnosť tónových zložiek vo frekvenčnom spektre špecifického hluku znamená, že pri objektivizácii hluku sa uplatňuje korekcia pre časový interval trvania takéhoto hluku. Napr. posudzovaná hodnota ekvivalentnej hladiny A akustického tlaku špecifického hluku s tónovou zložkou pre zodpovedajúci referenčný časový interval sa určí podľa vzťahu:

$$L_{R,Aeq,T_{ref}} = 10 \log \frac{1}{T_{ref}} \left[T_c \times 10^{0,1(L_{Aeq,T} + K)} \right] + U$$

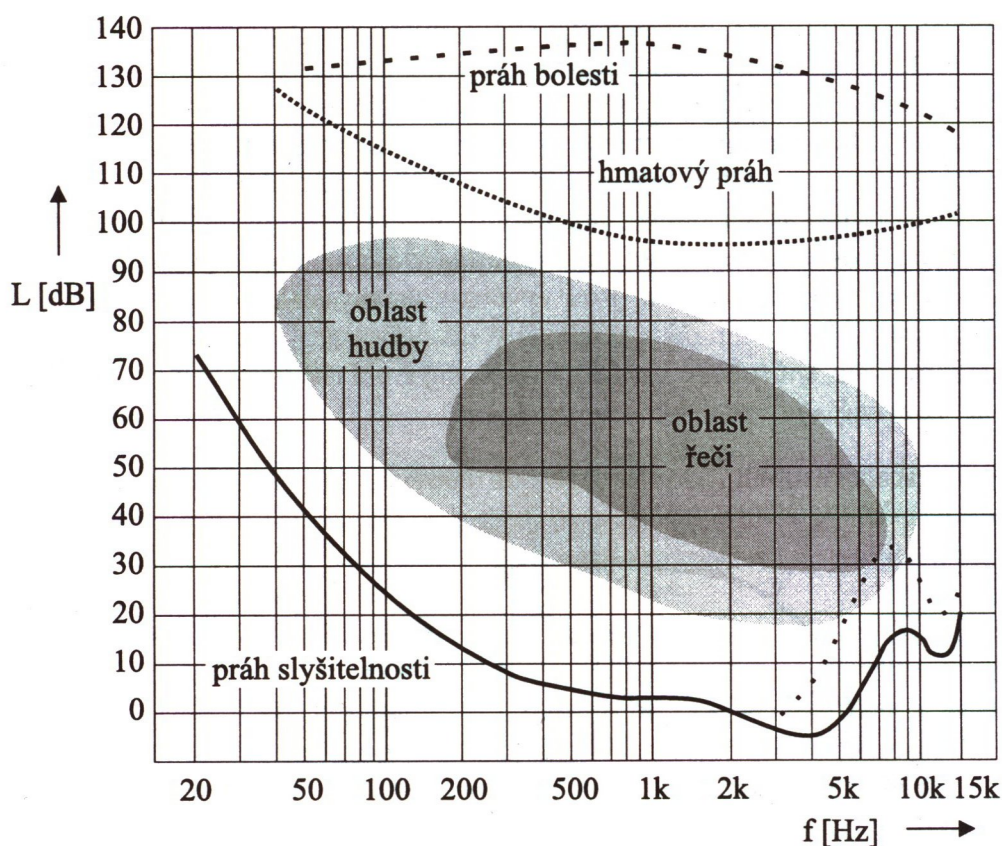
kde $L_{Aeq,T}$ - nameraná hodnota ekvivalentnej hladiny A akustického tlaku za časový interval merania T , charakterizujúca úroveň špecifického hluku v zodpovedajúcom referenčnom časovom intervale,
 T_c - celková dĺžka trvania špecifického hluku s tónovou zložkou v zodpovedajúcom referenčnom časovom intervale,
 T_{ref} - referenčný časový interval (deň, večer, noc),
 K - hodnota korekcie na tónový hluk,
 U - hodnota rozšírenej neistoty výsledkov merania.

Číselná hodnota korekcie na tónový hluk (+ 5 dB) pri stanovení posudzovaných hodnôt určujúcich veličín zohľadňuje vlastnosti špecifického hluku a jeho nepríjemný, rušivý vnem a pri dlhodobom pôsobení aj nešpecifické (systémové) účinky na zdravie ľudí. Posudzovanie nešpecifických účinkov hluku vychádza z poznatkov fyziologickej a psychologickej akustiky.

2. Vnímanie zvuku

Aby bol zvuk počuteľný, musí jeho intenzita, resp. akustický tlak prekročiť určitú hodnotu, ktorú nazývame prahom počuteľnosti (sluchový prah). Prah počuteľnosti závisí od frekvencie, ale je rozdielny podľa toho, či sa jedná o čisté tóny, pásmový alebo širokopásmový zvuk. Zároveň závisí aj od smeru dopadu zvuku a od toho, či sa jedná o prah monaurálny (jedným uchom) alebo binaurálny.

Ak počuteľný zvuk dosiahne veľkých intenzít, môžu byť podráždené aj hmatové receptory (okolo 120 dB) a pri ďalšom zvýšení intenzity je podráždenie sluchového orgánu vnímané ako bolesť (okolo 140 dB) a táto úroveň intenzít je nazývaná prahom bolesti. Na obrázku č. 1 je znázornené sluchové pole, kde je možné vymedziť oblasť frekvencií a intenzít reči a hudby.



Obr. č. 1: Sluchové pole

3. Základné vlastnosti sluchového vnemu

Sluchový vnem je odrazom zvukového (akustického) podnetu vo vedomí človeka, avšak medzi zvukovým podnetom a sluchovým vnemom sú rozdiely, ktoré vznikajú premenou v sluchovom orgáne a v centrálnej nervovej sústave.

Fyziologickou analýzou bolo potvrdené, že fyzikálnym vlastnostiam zvuku zodpovedajú "určité" vlastnosti subjektívneho sluchového vnemu, pričom ich vzájomná závislosť nie je jednoduchá a ani priamoúmerná. Základné fyzikálne vlastnosti zvuku - intenzita, frekvencia a spektrálna skladba harmonických tónov sú v kvantitatívnych vzťahoch k základným vlastnostiam subjektívneho vnemu - hlasitosti, výške zvuku a farbe zvuku.

3.1 Hlasitosť, hladina hlasitosti a krivky rovnakej hlasitosti

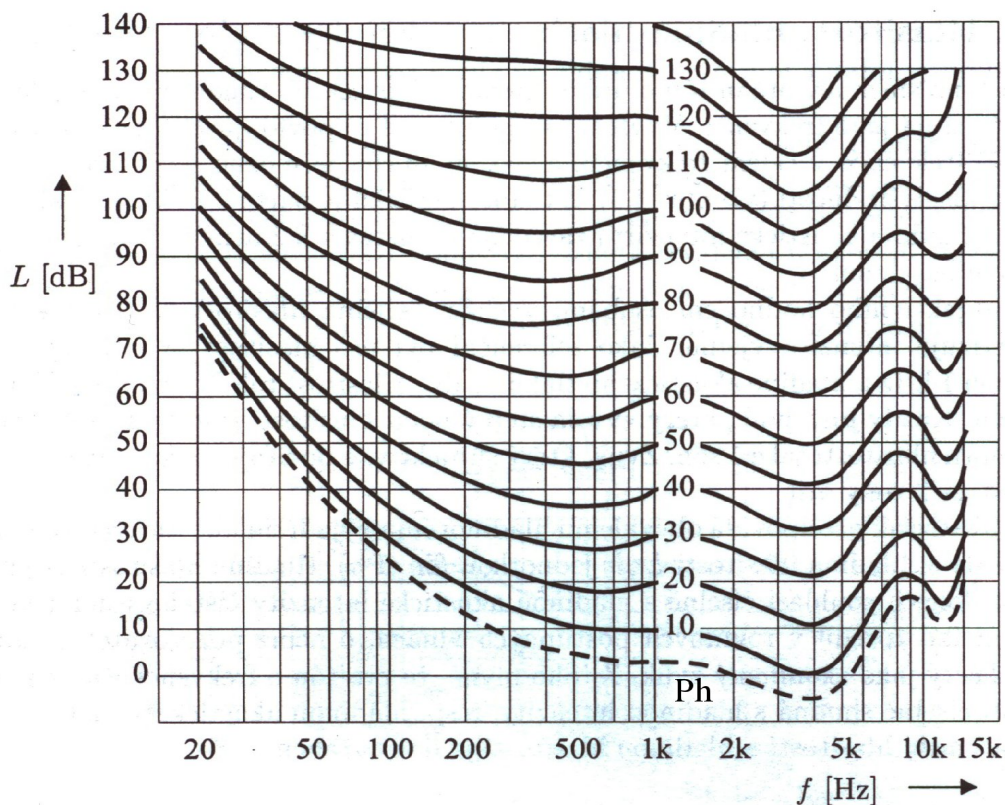
Intenzita zvuku pri subjektívnom hodnotení je charakterizovaná veličinou, ktorej hovoríme hlasitosť N s jednotkou son. Hlasitosť síce vzrastá so zvyšujúcou sa intenzitou, ale závisí aj od frekvencie a frekvenčného rozsahu (zloženia zvuku) a jej rozsah je obmedzený prahom počutia a prahom bolesti.

Subjektívny vnem hlasitosti zvuku však nesleduje presne Weberov-Fechnerov logaritmický zákon, a teda ani nárast hladiny akustického tlaku. Preto sa zaviedla veličina - hladina hlasitosti L_N s jednotkou phon (Ph). Hladina hlasitosti vo phonoch skúmaného zvuku číselne súhlasí s hladinou akustického tlaku v dB čistého tónu o frekvencii 1 kHz, o ktorom pozorovateľ s normálnym sluchom usúdi, že je rovnako hlasitý ako skúmaný zvuk. Z toho vyplýva, že pre tón o frekvencii 1 kHz je hladina hlasitosti vo phonoch zhodná s hladinou intenzity v dB, resp. s hladinou akustického tlaku. Vzťah medzi hlasitosťou a hladinou hlasitosti je matematicky vyjadrený:

$$N = 2^{(L_N - 40)/10} \rightarrow L_N = 40 + 33,2 \log N$$

Z takto definovanej závislosti vyplýva, že pri každom zvýšení hladiny hlasitosti o 10 Ph sa zväčšuje hlasitosť na dvojnásobok.

Na základe definície hladiny hlasitosti bola v minulosti vykonaná rada subjektívnych testov, ktorých výsledkom sú krivky rovnakej hladiny hlasitosti stanovené pri zrovnávaní s vnemom tónu o frekvencii 1 kHz. Pre potreby hodnotenia zvuku boli krivky normalizované a sú znázornené na obrázku č. 2, ktorý ukazuje, ako sú krivky rovnakej hladiny hlasitosti závislé na frekvencii.



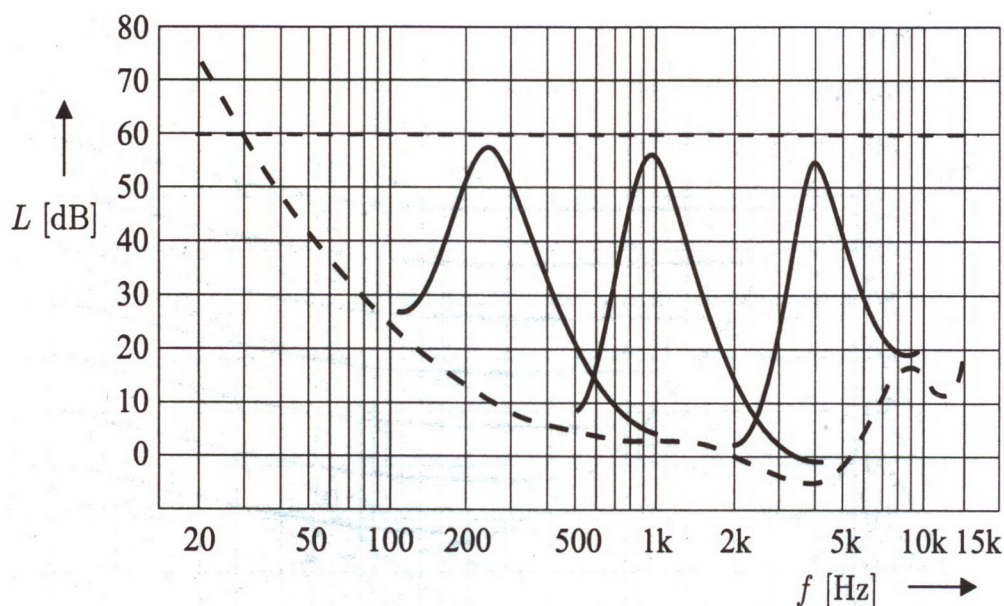
Obr. 2: Krivky rovnakej hladiny hlasitosti pre čisté tóny vo voľnom zvukovom poli
 Pretože hladiny hlasitosti sa získali pri meraní čistých tónov, pre zvuk so zložitým frekvenčným spektrom, ktorý obsahuje veľa frekvencií s rôznymi úrovňami je vyčíslenie hladiny hlasitosti zložitá. Najprv je potrebné vykonať pásmovú frekvenčnú analýzu, zistiť hladiny akustického tlaku v pásmach a výpočtom (Zwickerova metóda, Stevensonova metóda) určiť výslednú (celkovú) hodnotu hlasitosti a potom prepočítať na hladinu hlasitosti.

3.2 Maskovanie a kritické pásma

Maskovanie je jav, pri ktorom vnem nejakého zvuku je potlačený iným zvukom obvykle silnejším, ktorý sa označuje ako maskujúci. Maskujúci efekt sa vysvetľuje ako posun prahu počutia spôsobený zvukom vyššej intenzity, pričom tento efekt závisí najmä od rozdielu frekvencií medzi obidvomi zvukmi.

Na kvantifikovanie maskujúceho efektu sa určuje prah maskovania, ktorý zodpovedá hladine akustického tlaku testovaného čistého (sínusového) tónu práve zamaskovaného maskujúcim zvukom.

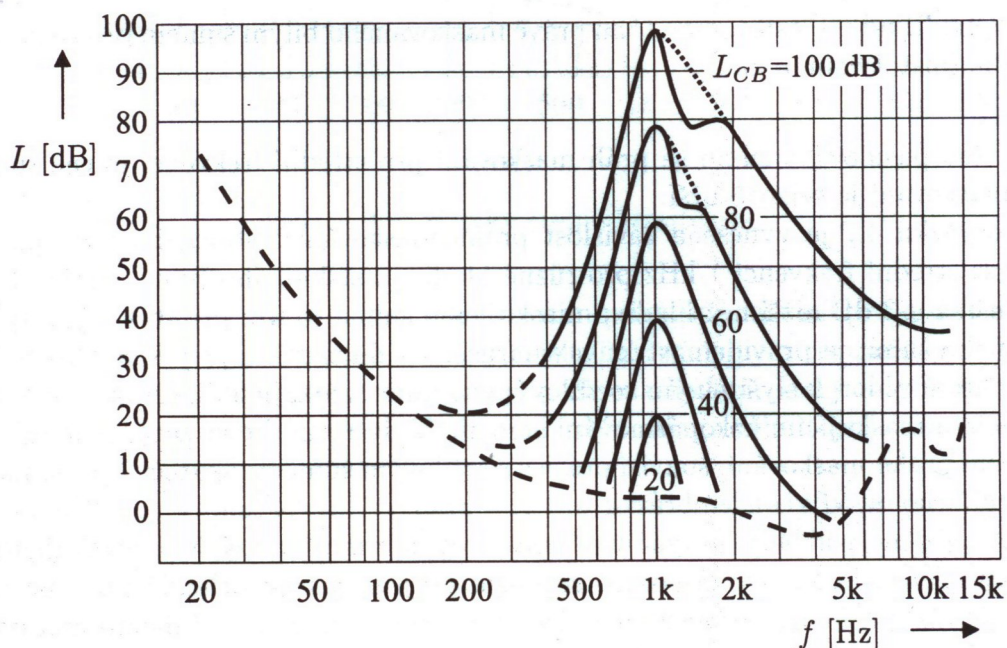
V prípade, že testovací tón je maskovaný úzkopásmovým šumom (biely šum filtrovaný pásmovou priepustňou s kritickou šírkou pásma) sú na obrázku č. 3 zobrazené tri priebehy prahu maskovania tónu pásmovým šumom práve o kritickej šírke pásma a hladine 60 dB pre stredné frekvenčné pásma 250 Hz, 1 kHz a 4 kHz.



Obr. 3: Hladina testovacieho tónu práve zamaskovaná pásmovým šumom o kritickej šírke pásma pre stredné frekvencie pásma 250 Hz, 1 kHz a 4 kHz a hladine 60 dB

Z obrázku je zrejmé, že so vzrastajúcou frekvenciou maskujúceho pásmového šumu sa prah maskovania pre stredné frekvencie mierne znižuje.

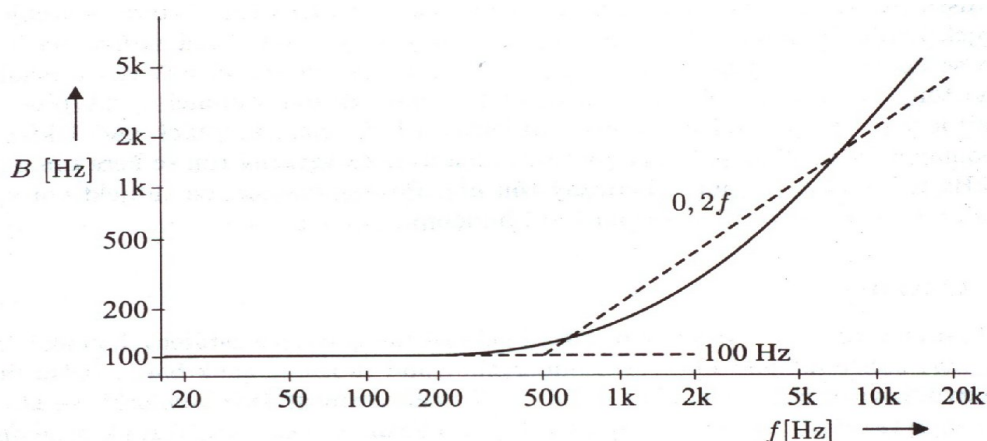
Na obrázku č. 4 je znázornená závislosť prahu maskovania testovacieho tónu pásmovým šumom so strednou frekvenciou 1 kHz pre rôzne hladiny maskujúceho šumu.



Obr. č. 4: Hladina testovacieho tónu práve zamaskovaná pásmovým šumom o kritickej šírke pásma so strednou frekvenciou pásma 1 kHz v závislosti na frekvencii testovaného tónu pre rôzne hladiny maskovacieho šumu L_{CB}

Najväčší maskovací účinok testovacieho tónu sa dosiahne pri strednej 1 kHz a pre frekvencie blízke k tejto frekvencii. Pri tónoch s nižšou hladinou akustického tlaku (do 50 dB) je maskujúci efekt rozložený približne súmerne na obidve strany okolo maskujúceho šumu a pri vyšších hladinách je nesúmerný a rastie na stranu k vyšším frekvenciám.

Z obrázkov je vidieť, že maskovania čistého tónu šumom sa zúčastňuje len pomerne úzke pásmo v okolí maskovaného tónu. Šírka tohto pásma sa nazýva kritická šírka pásma B , ktorá na mení s frekvenciou. Na obrázku č. 5 je schematicky znázornená závislosť kritickej šírky pásma B na frekvencii.



Obr. č. 5: Kritická šírka pásma v závislosti na frekvencii

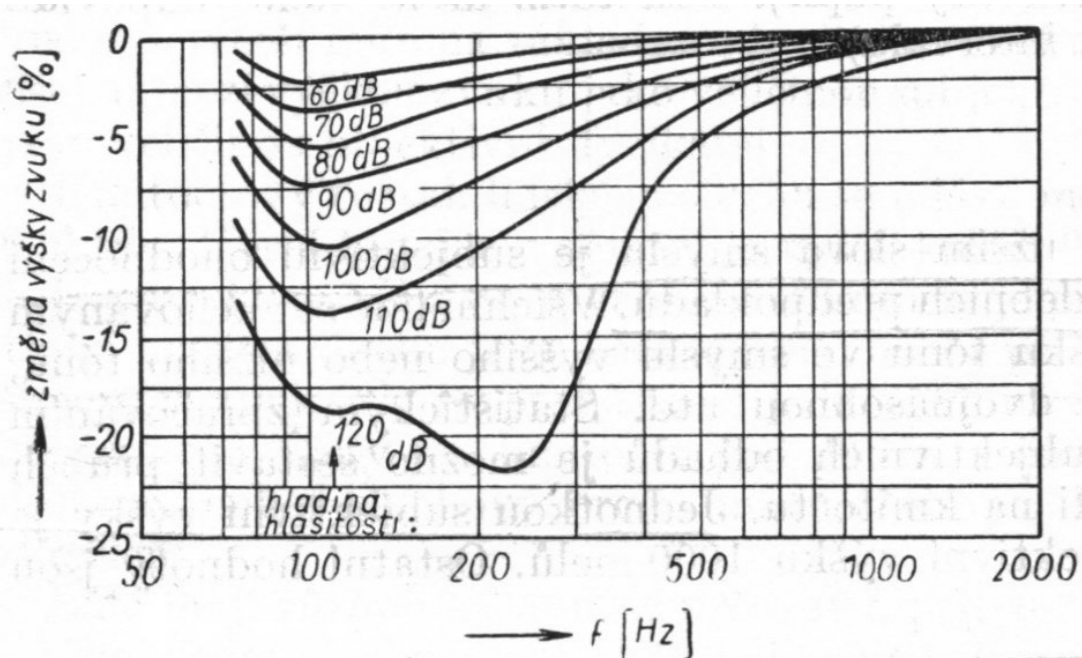
Kritická šírka pásma až do frekvencie 500 Hz je rovná 100 Hz a potom sa zvyšuje približne funkciou $0,2f$, teda o 20 % strednej frekvencie pásma.

3.3 Výška zvuku (tónu)

Výška zvuku (tónu) je vlastnosť subjektívneho sluchového vnemu, ktorá odráža periodicitu zvukového podnetu (javu) vo vedomí človeka. Je nutné rozlišovať medzi výškou jednoduchého tónu, zloženého tónu (hudobné tóny obsahujú okrem základného tónu, rad vyšších harmonických) a výškou rôznych šumov a hluku.

Podľa spôsobu určenia výšky jednoduchého (sínusového) tónu sa zisťuje absolútna výška tónu, relatívna výška tónu alebo subjektívna výška tónu. Absolútna výška tónu je daná frekvenciou čistého tónu (sínusového) s ktorým má skúmaný zvuk rovnakú výšku pri subjektívnom porovnávaní. Relatívna výška tónu je daná hudobným intervalom medzi tónom skúmaným a zvoleným základným tónom, pričom hudobný interval medzi dvomi tónmi je daný pomerom ich frekvencií. V technickej akustike sa obvykle používa ako jednotka relatívnej výšky tónu oktava, t.j. interval pre ktorý pomer $f_2/f_1 = 2$.

Z hľadiska psychoakustiky je najdôležitejšia subjektívna výška tónu, ktorá sa určuje pri subjektívnom hodnotení tónov. Testy potvrdili, že subjektívna výška tónu súvisí s jeho frekvenciou, avšak nie je s ňou totožná a závisí aj na intenzite, resp. hladine akustického tlaku. Na obrázku č. 6 sú znázornené krivky charakterizujúce zmenu subjektívnej výšky tónu pri zmene jeho hladiny akustického tlaku. Krivky udávajú o koľko sa zníži subjektívna výška čistého tónu, ak sa zosilní tón z hladiny 40 dB na požadovanú hladinu. Napr. ak sa zvýši hladina akustického tlaku tónu 100 Hz zo 40 dB na 100 dB sa zdá, ako by tým poklesla jeho frekvencia o 10 %.



Obr. č. 6: Zmena subjektívnej výšky tónu pri zmene jeho intenzity

V oblasti vyšších frekvencií nad 4 kHz pri rovnakom náraste hladiny akustického tlaku sa zdá, ako by jeho frekvencia stúpala o 3 %.

Okrem uvedených aspektov subjektívneho vnímania výšky tónu, aby vznikol vnem istej výšky musí mať zvuk určité trvanie. Pri príliš krátkom trvaní zvuku je subjektívna výška tónu nižšia, ako zodpovedá frekvencii a ustalať sa až po určitej dobe minimálneho trvania.

4. Objektívne metódy na posúdenie počuteľnosti tónových zložiek

Z uvedených poznatkov o vlastnostiach sluchového vnemu vyplýva, že na subjektívny vnem vyvolaný pôsobením zloženého frekvenčného spektra zvuku (spojité spektrum s tónovými zložkami) vplýva viacero faktorov.

Na posúdenie (overenie) počuteľnosti tónových zložiek v hluku sú v STN ISO 1996-2:2008 uvedené dve metódy - referenčná metóda a zjednodušená metóda.

4.1 Referenčná metóda

Referenčná metóda overenia počuteľnosti tónových zložiek v hluku je založená na psychoakustickom chápaní kritických pásiem, čo sú pásma definované tak, že zvuk mimo kritického pásma výrazne neprispieva k počuteľnosti tónov vnútri tohto kritického pásma.

Táto metóda obsahuje postupy na ustálené a meniace tóny, úzkopásmový hluk a nízkofrekvenčné tóny vrátane stanovenia korekcie od 0 dB do 6 dB a pozostáva z troch krokov:

- prvým krokom je úzkopásmová (FFT) frekvenčná analýza hluku s A vážením a lineárnym priemerovaním,
- druhým krokom je určenie energeticky priemernej hladiny akustického tlaku tónu (tónov) a celkovej hladiny akustického tlaku maskovacieho hluku v kritickom pásme okolo tónu (tónov),
- a tretím krokom je výpočet tónovej počuteľnosti ΔL_{ta} a korekcie K_t .

Podrobný postup jednotlivých krokov pri aplikácii tejto metódy vrátane príkladov je uvedený v prílohe C normy.

4.2 Zjednodušená metóda

Prítomnosť prevyšujúcej tónovej zložky sa zisťuje porovnávaním časovo spriemerovanej hladiny akustického tlaku v niektorom tretinooktávovom pásme s časovo spriemerovanými hladinami akustického tlaku v dvoch príľahlých (susediacich) tretinooktávových pásmach. Pre prevyšujúcu tónovú zložku, ktorej prítomnosť sa identifikuje, platí určitá konštantná diferenciacia hladiny, pričom:

- pri nízkofrekvenčných tretinooktávových pásmach (25 Hz až 125 Hz) je diferenciacia 15 dB,
- pri stredofrekvenčných pásmach (160 Hz až 400 Hz) je diferenciacia 8 dB,
- pri vysokofrekvenčných pásmach (500 Hz až 10 000 Hz) je diferenciacia 5 dB.

Rozdiel v diferencii hladín akustického tlaku príľahlých tretinooktávových pásiem súvisí s citlivosťou sluchového orgánu v počuteľnom spektre hluku.

5. Poznatky zo zisťovania tónových zložiek

Postup zisťovania tónových zložiek v lineárnom frekvenčnom spektre hluku (bez korekcie na A váhovú funkciu) uvedený vo vyhláske MZ SR č. 549/2007 Z.z. v niektorých prípadoch neumožňuje hodnoverné posúdenie ich výskytu a počuteľnosti v širokopásmovom spektre špecifického hluku. Potvrďuje to aj postup posúdenia počuteľnosti tónových zložiek uvedený v STN ISO 1996-2:2008.

Rozšírenie oblasti výskytu tónových zložiek na dve susedné tretinooktávové pásma predpokladá, že tónová zložka sa môže nachádzať medzi oboma tretinooktávovými pásmami, ale prináša aj možné pochybnosti. V takýchto prípadoch je exaktnejšie zistenie tónových zložiek úzkopásmovou frekvenčnou analýzou.

V prípadoch, keď spektrum pôsobiaceho hluku je širokopásmové a energeticky významné, môže dochádzať k maskovaniu prítomných tónových zložiek hluku, čo meraním napr. tretinooktávovou analýzou nie je postihnuteľné.

Komplikovaná situácia môže nastať pri preukazovaní prítomnosti tónových zložiek špecifického hluku vo vnútorných chránených priestoroch a to najmä v oblasti nízkych frekvencií. Pri relatívne nízkych hladinách A akustického tlaku (pod 30 dB) špecifického hluku sa pri tretinooktávovej analýze hluku uplatňuje aj spektrum hluku pozadia.

6. Závery

Zatiaľ čo o význame uplatňovania korekcie na tónové zložky pri posudzovaní negatívnych účinkov pôsobiaceho hluku v chránenom mimopracovnom prostredí nie je pochybnosť, jednoznačné (hodnoverné) preukazovanie počuteľnosti tónových zložiek objektívnymi metódami je náročné.

Okrem jasných prípadov výskytu a počuteľnosti tónových zložiek vo frekvenčnom spektre hluku je aj mnoho prípadov, kde preukazovanie ich výskytu a počuteľnosti nie je jednoznačné.

Jednoznačné preukázanie počuteľnosti tónových zložiek je vtedy, keď tónové zložky, ktoré ovplyvňujú príslušné tretinooktávové pásma prevyšujú susedné pásma o viac ako 5 dB a subjektívne sú vnímané ako diskkrétne pískanie, hučanie a pod.

Zložitejšia situácia je v prípade hluku s výskytom tónových zložiek v oblasti nízkych frekvencií, z dôvodu výraznej frekvenčnej závislosti prahu počutia a keď identifikované (kritické) frekvenčné pásmo v rámci celého spektra nie je energeticky významné.

V nariadení vlády ČR č. 148/2006 Sb., okrem preukazovania tónovej zložky v zhode s postupom u nás, platí aj podmienka, že v pásme frekvencií 10 Hz až 160 Hz je ekvivalentná hladina akustického tlaku v zodpovedajúcom tretinooktávovom pásme vyššia ako hladina prahu počutia stanovená pre zodpovedajúce tretinooktávové pásmo.

Na objektívne posúdenie výskytu a počuteľnosti tónových zložiek špecifického hluku sa odporúča aplikovať metódy uvedené v STN ISO 1996-2:2008.

7. Odkazy

- [1] Vyhláška MZ SR č. 549/2007 Z.z. ktorou sa ustanovujú podrobnosti o prípustných hodnotách hluku, infrazvuku a vibrácií a o požiadavkách na objektivizáciu hluku, infrazvuku a vibrácií v životnom prostredí v znení vyhlášky MZ SR č. 555/2007 Z.z.
- [2] J. Merhaut a kolektív: Příručka elektroakustiky, SNTL, Praha 1964
- [3] L. L. Beranek: Snižování hluku, SNTL, Praha 1965
- [4] S. Žiaran: Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom, Vyd. STU, Bratislava 2008
- [5] STN ISO 1996-1:2006 Akustika. Opis, meranie a posudzovanie hluku vo vonkajšom prostredí. Časť 1: Základné veličiny a postupy posudzovania
- [6] STN ISO 1996-2:2008 Akustika. Opis, meranie a posudzovanie hluku vo vonkajšom prostredí. Časť 2: Určovanie hladín hluku
- [7] Sborník ČAS : 77. akustický seminár Zlenice, 2008
- [8] Nariadenie vlády ČR č. 148/2006 Sb. o ochrane zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací