

Fyziologická akustika a psychoakustika

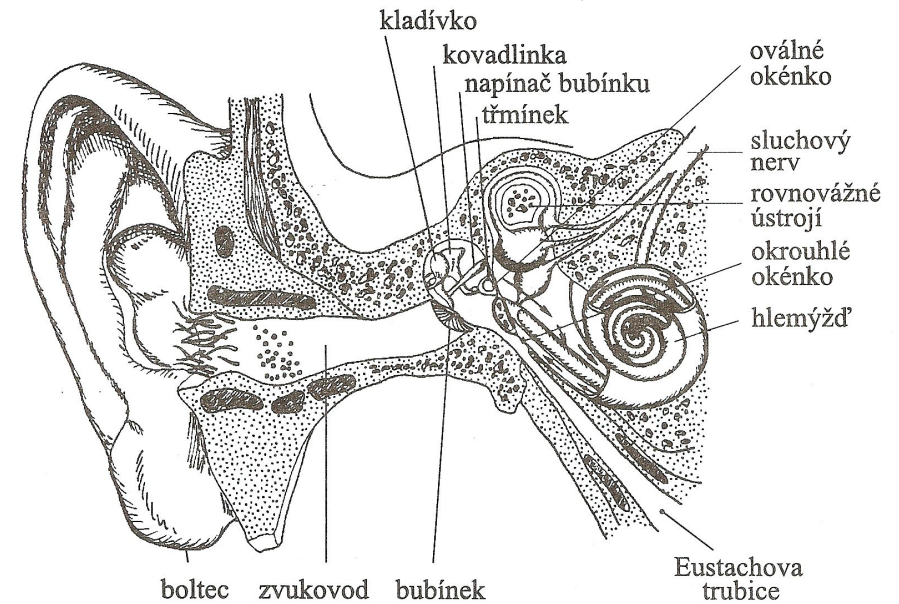
Předmětem fyziologické akustiky je způsob zpracování zvukového signálu - podnětu - sluchovým orgánem, který je prostřednictvím nervového systému spojen s mozkovou kůrou, kde působí sluchový vjem. Sluchový vjem je tedy odrazem zvukového děje ve vědomí člověka. Není však jeho přesným obrazem, protože je ovlivňován subjektivními fyziologickými zákonitostmi (např. únavou). Fyziologická akustika v lékařském pojetí se zabývá sluchem především z hlediska jeho funkce či poruch, avšak vnímání zvuku souvisí i s jeho vlivy na zdraví člověka. Fyziologická akustika se také zabývá hlasem a řečí z akustického hlediska. Pojem psychoakustika byl zaveden autory v šedesátých a sedmdesátých letech (např. [37]) a zabývá se obdobnými problémy jako fyziologická akustika, její těžiště je ale především v oblasti subjektivního vnímání zvuků. Závěry psychoakustických studií jsou využívány zejména v mladém odvětví akustiky zabývajícím se kvalitou zvuku.

Sluchový orgán

Zvuk, se kterým přicházíme do styku, vnímáme především sluchovým ústrojím. Extrémně silné zvuky, především nižších frekvencí, můžeme vnímat i povrchem těla, to ovšem není předmětem tohoto odstavce. Sluchový orgán z anatomického hlediska dělíme na tři části: zevní ucho, střední ucho a vnitřní ucho.

Zevní ucho

Zevní ucho se skládá z boltece a zvukovodu. Boltec určuje směrovou charakteristiku sluchového orgánu. Schopnost lokalizace směru, ze kterého zvuk přichází, souvisí s binaurálním vnímáním a projevuje se až od cca 500 Hz, přičemž nejlépe je možno lokalizovat zvuky s frekvencemi kolem 5 kHz. U zvířat je rozpoznávání směru, ze kterého přichází zvuk, zdokonaleno možností hýbat ušima. U lidí tato schopnost již zanikla a je nahrazena malými pohyby hlavy. Zvukovod je trubice o délce asi 25 mm a oválném průřezu s šířkou 7 až 8 mm. V něm dochází k rezonanci dopadajícího zvuku (v pásmu $2 \div 6$ kHz), což ovlivňuje frekvenční charakteristiku sluchového orgánu. Pro frekvence kolem 4 kHz tím dochází k nárůstu akustického tlaku před bubínkem až o 10 dB. Zvukovod není zcela přímý, avšak vhodným tahem za boltec je možné jej vyrovnat tak, až je (při vhodném osvětlení) vidět bubínek, který představuje předěl mezi zevním a středním uchem.



Obrázek 4.1: Sluchový orgán.

Střední ucho

Bubínek je oválná blanka z tenkého vaziva, která má tvar pláště kužele mířícího špičkou dovnitř. Vertikální průměr je 9 až 10 mm a horizontální je o něco menší. K bubínku je shora přirostlá rukojeť kladívka, které je první ze tří sluchových kůstek středního ucha: kladívka, třmínku a kovadlinky.

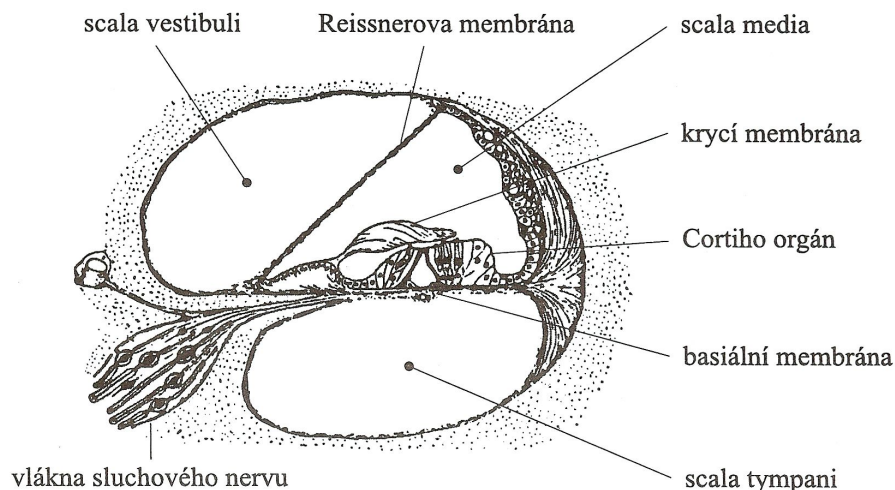
Kladívko vrostlé rukojetí do bubínku se na horním konci rozšiřuje do hlavičky, která je spojena s kovadlinkou. Ta se rozděluje na dva výběžky. K prvnímu, kratšímu, jsou uchyceny závěsné vazy. Druhý, delší, probíhá dolů podél rukojeti kladívka a je sklouben s třetí kůstkou: třmínkem. Třmínek je zakončen oválnou ploténkou o ploše cca 3,5 mm², která je přirostlá k blance oválného okénka. Oválné okénko odděluje střední ucho od vnitřního ucha.

Do středního ucha ústí Eustachova trubice, která spojuje dutinu středního ucha (někdy nazývanou bubínková dutina) s nosohltanem. V klidu je uzavřena a otevírá se při polknutí. Ve středním uchu jsou dva malé svaly: napínač bubínku, který je upnut na krček kladívka a třmínkový sval, který je napnut mezi třmínkem a stěnou středního ucha. Tyto svaly mají důležitou funkci při ochraně vnitřního ucha při přílišném hluku.

Střední ucho z hlediska technického pracuje jako pákový mechanický impedanční převodník, který umí měnit své parametry podle velikosti podnětů. Převádí kmity vzduchu dopadající na bubínek v kmity v tekutině vnitřního ucha. Středoušní svaly se reflexivně stahují při překročení hladiny cca 70 dB [12], čímž chrání sluchový orgán. Reflexní reakce nastupuje s jistou latencí, takže pro krátké impulsy (méně než 30 ms) není účinná. Proto je impulsní hluk nebezpečnější z hlediska poškození sluchu.

Vnitřní ucho

Vnitřní ucho se nachází v kanálcích ve skalní kosti, které se nazývají labyrint. V kostěném labyrintu je uložen blanitý labyrint, což jsou vlastně dva smyslové orgány. Prvním je tzv. vestibulární ústrojí, které se nachází ve třech polokruhovitých kanálcích a v před-síni. Pohyb tekutiny uvnitř způsobuje podněty, které nám pomáhají udržovat rovnováhu. Sluchová část vnitřního ucha se nachází v hlemýždi. Hlemýžď (cochlea) tvoří necelé tři spirálovité závity a je rozdělen na dvě patra: horní, scala vestibuli a dolní, scala tympani vyplněná perilymfou (viz obr. 4.2). Mezi nimi je ještě hlemýžďová chodba, scala media, přibližně trojúhelníkového průřezu vyplněná endolymfou, která má oproti perilymfě vysokou koncentraci draslíku (35× více) a nízkou koncentraci sodíku, což je příčinou elektrického potenciálového rozdílu mezi perilymfou a endolymfou (cca +80 mV). Hlemýžďová chodba je shora oddělená Reissnerovou membránou a zdola basilární membránou, na které se nachází Cortiho orgán. Cortiho orgán slouží jako převodník z mechanických oscilací vnitřního ucha na signály, které mohou být zpracovány nervovým systémem. Je složen z pilířových a podpůrných buněk, mezi nimiž je rozmístěno ve čtyřech řadách (jedna vnitřní a tři vnější) přibližně 20 000 vláskových buněk, jejichž vnitřní potenciál je -60 mV oproti perilymfě. Při rozkmitání basilární membrány se výběžky vláskových buněk ohýbají a deformují dotykem s krycí membránou. Tím jsou vyvolány změny elektrických poměrů, které jsou na spodní straně vláskové buňky předávány do nervových zakončení sluchového nervu. Ten přivádí zvukem způsobené vzruchy do sluchové oblasti kůry velkého mozku. Zde pak dochází ke konečné analýze zvukového podnětu.



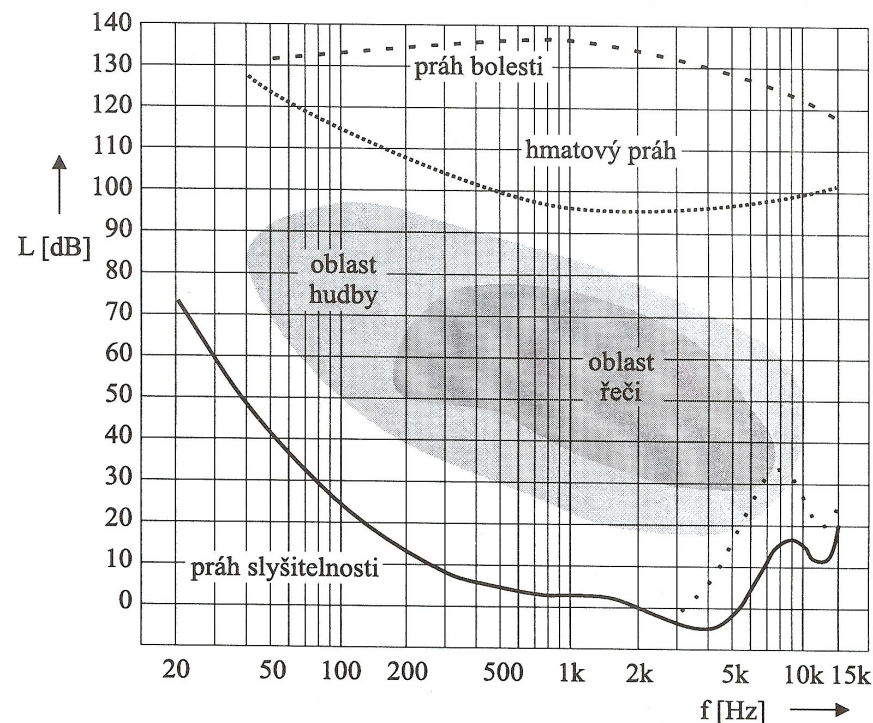
Obrázek 4.2: Řez hlemýžděm.

Vnímání zvuku

Jak již bylo řečeno, sluchový orgán lze považovat za snímač akustického tlaku. Aby byl zvuk slyšitelný, musí intenzita, resp. akustický tlak, překročit určitou hodnotu, která se nazývá práh slyšitelnosti nebo sluchový práh. Práh slyšitelnosti je závislý na frekvenci, ale

je také rozdílný podle toho, zda se jedná o čisté tóny nebo pásmový či širokopásmový šum. Závisí také na směru dopadu zvuku a zda se jedná o práh monaurální (jedním uchem) nebo binaurální [33].

Naopak při určité velké intenzitě podnětu mohou být drážděny i hmatové receptory (kolem 120 dB), tomu odpovídá práh hmatový a při dalším zvýšení intenzity je již podráždění sluchového orgánu vnímáno jako bolest (okolo 140 dB). Zde se nachází práh bolesti. Při takovýchto intenzitách dochází poměrně rychle k trvalému poškození sluchového orgánu. Mezi prahem slyšitelnosti a prahem hmatovým se nachází oblast slyšitelnosti neboli sluchové pole. Ve sluchovém poli je možno najít oblast frekvencí a intenzit řeči a hudby, jak je znázorněno na obr. 4.3.



Obrázek 4.3: Sluchové pole.

Weberův-Fechnerův zákon

Studiu vnímání zvuku při různých frekvencích bylo věnováno mnoho experimentů a pro praktickou akustiku je nejvýznamnější výsledek, který je znám jako Weberův-Fechnerův zákon. Ten říká, že přírůstek počítku je úměrný relativní změně podnětu. Z toho tedy vyplývá, že velikost počítku je úměrná logaritmu intenzity podnětu¹. Tento zákon je jedním z důvodů užívání hladinového vyjadřování akustických veličin.

¹V literatuře najdeme také ekvivalentní vyjádření: Roste-li podnět geometrickou řadou, roste počíteč aritmetickou řadou.

Hlasitost, hladina hlasitosti a křivky stejné hlasitosti

Přichází-li na sluchový orgán tón o určité hladině akustického tlaku, intenzita sluchového vjemu závisí na jeho frekvenci. Vyhledáváním intenzit odpovídajících počátku vjemu pro jednotlivé frekvence v celém frekvenčním pásmu sluchu je možno najít křivku, která se nazývá práh slyšitelnosti (viz obr. 4.3). Z tohoto obrázku je patrné, že hladina akustického tlaku (ev. hladina akustické intenzity) zavedená v odstavci 3.2 není vhodná pro vyjádření subjektivního vjemu.

Ze subjektivního hodnocení osobami vychází veličina *hlasitost* N (loudness), která charakterizuje intenzitu vjemu. Jako referenční byl pro hlasitost vybrán sinusový tón o frekvenci 1 kHz a hladině akustického tlaku 40 dB. Hlasitost tohoto tónu byla definována jako 1 son. Každý jiný zvuk, který vyvolá stejný pocit hlasitosti jako tento referenční tón, má hodnotu hlasitosti také 1 son. Zvuk, který subjektivně pociťujeme jako dvakrát silnější, má hlasitost 2 sony atd.

Hlasitost však neodpovídá obvyklému hladinovému vyjádření akustických veličin. Proto byla zavedena hladina hlasitosti L_N s jednotkou *fon* (Ph). Hladina hlasitosti zkoumaného zvuku ve fonech souhlasí číselně s hladinou akustické intenzity čistého tónu 1 kHz v dB přicházejícího zřepředu v rovinných postupných vlnách, o němž pozorovatel usoudí, že je stejně hlasitý jako zkoumaný zvuk. Z toho plyne, že pro tón o frekvenci 1 kHz je hladina hlasitosti číselně shodná s hladinou intenzity, resp. hladinou akustického tlaku².

Vztah mezi hlasitostí a hladinou hlasitosti je dán vztahem

$$N = 2^{0,1(L_N - 40)}, \quad (4.1)$$

nebo

$$L_N = 40 + 33,2 \log N. \quad (4.2)$$

Na základě definice hladiny hlasitosti byla v první polovině minulého století provedena řada subjektivních testů, jejichž výsledkem jsou křivky stejné hlasitosti stanovené srovnáváním s vjemem pro tón 1 kHz. Ty jsou dnes pro potřeby hodnocení zvuku normalizovány a jsou znázorněny na obr. 4.4, který ukazuje, jak jsou křivky stejné hlasitosti závislé na frekvenci.

Hlasitost, resp. hladina hlasitosti jsou subjektivní veličiny³, nicméně jejich hodnocení je natolik významné, že byly vyvinuty dvě objektivní metody jejich výpočtu z třetinooktávových a oktávových spekter akustického tlaku. Jedná se o metody Stevensovu a Zwickerovu, které se od sebe sice značně liší, avšak výsledky dávají až na výjimky prakticky shodné⁴. Hlasitost je také důležitý psychoakustický znak pro hodnocení kvality zvuku především výrobků.

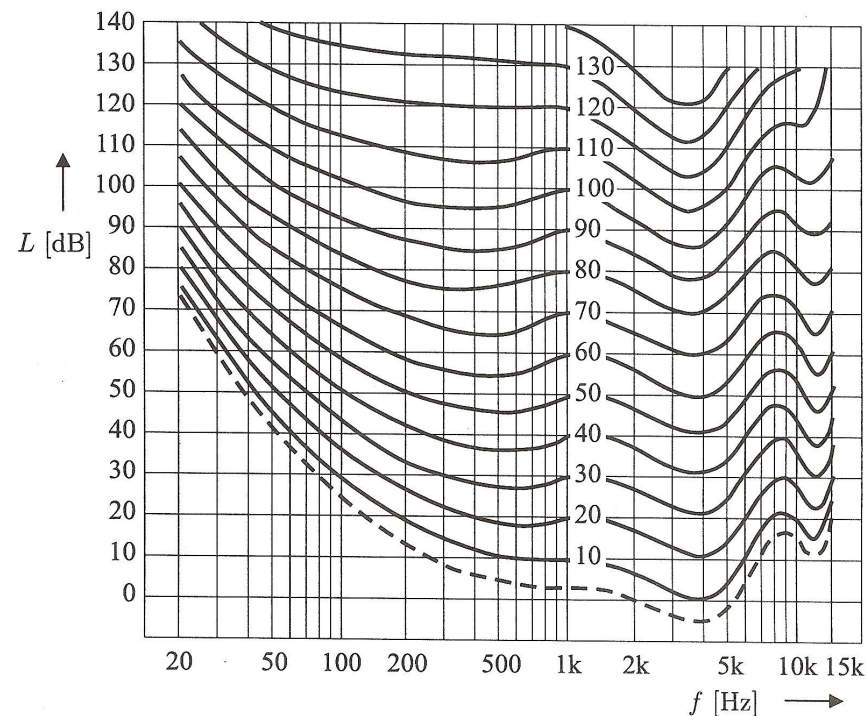
Maskování

Maskování je jev, který hraje významnou roli v našem každodenním životě. Příklady tohoto jevu najdeme v pracovním prostředí, kdy silnější hluk jednoho stroje způsobí, že tišší

²Pro rovinnou postupnou vlnu je hladina akustické intenzity až na malou korekci rovna hladině akustického tlaku (viz odst. 3.2). Zde uvedená definice je technicky přesná, ale je třeba mít na paměti, že ucho je tlakový snímač a proto je praktičtější srovnávat hladiny hlasitosti s hladinami akustického tlaku.

³Hlasitost je také fyziologická veličina, elektrofyziologickými metodami lze hlasitost zjišťovat bez subjektivních výpovědí.

⁴Podrobnosti jsou v normách ISO 532A (Stevens) a ISO 532B (Zwicker).

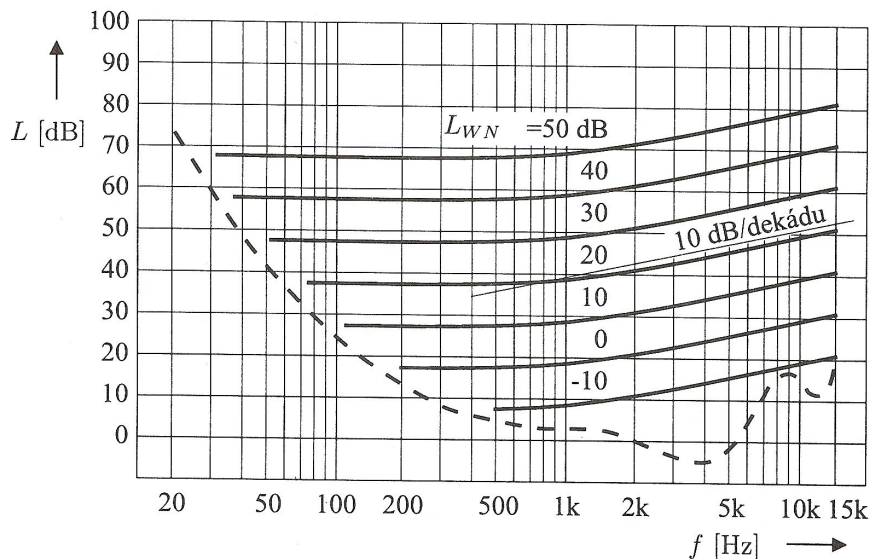


Obrázek 4.4: Křivky stejné hlasitosti.

stroj nelze kontrolovat sluchem, nebo ve venkovním prostředí, kde při průjezdu hlučného automobilu musíme zvýšit hlasitost našeho hlasu, aby nám bylo rozumět. Pro kvantifikování efektu maskování se nejčastěji určuje práh maskování, který odpovídá hladině akustického tlaku testovaného zvuku (nejčastěji čistého sinusového tónu) právě zamaskovaného maskujícím zvukem.

Fyziologická teorie maskování vychází z teorie slyšení, která předpokládá, že v závislosti na frekvenci přijímaného zvuku je rozkmitávána basilární membrána v různých vzdálenostech od oválného okénka. Přicházejí-li na sluchový orgán dva zvuky o shodných či blízkých frekvencích, dochází k jejich obtížnému rozlišování tj. maskování. Pro tento krátký souhrn předpokládejme, že maskovaný zvuk je čistý (sinusový) tón. Ten může být kromě dalších tónů (viz [37]) maskován různými druhy šumů. Průběh prahů maskování pro různé hladiny spektrální hustoty bílého šumu najdeme na obr. 4.5. Z obrázku je patrné, že prahové hodnoty jsou konstantní zhruba do 500 Hz a pro vyšší frekvence pak stoupají o přibližně 10 dB na dekádu. Pro frekvence do 500 Hz jsou mezní hladiny maskovaného tónu přibližně o 17 dB vyšší než hladina spektrální hustoty (s rostoucí frekvencí pak i více). Z toho vyplývá, že i záporné hladiny maskujícího šumu mohou způsobit jev maskování [37].

Testovací tón může být zamaskován také úzkopásmovým šumem, kterým rozumíme bílý šum filtrovaný pásmovou propustí s kritickou šířkou pásma nebo užší (viz odst. 4.2.4). Na obrázku 4.6 jsou zobrazeny tři průběhy prahu maskování tónu pásmovými šumy právě o kritické šířce pásma (zde je hladina maskujícího šumu uvedena jako celková hladina akustického tlaku). Z obrázku je při pozornějším pohledu patrné, že se vzrůstající frekvencí



Obrázek 4.5: Hladiny testovacího tónu právě maskovaného bílým šumem pro různé hladiny spektrální hustoty šumu L_{WN} .

maskujícího pásmového šumu se práh maskování pro střední frekvenci mírně snižuje a i oblast maskování je celkově užší.

Na obrázku 4.7 je vynesena závislost prahu maskování testovacího tónu pásmovým šumem se střední frekvencí 1 kHz pro různé hladiny maskujícího šumu. Vrchol křivky je vždy zhruba o 3 dB nižší než hladina maskujícího šumu. Pouze pro dvě nejvyšší hladiny maskujícího šumu je pravidelnost křivek narušena nelineárními jevy v našem sluchovém orgánu, které vedou k slyšitelným rozdílovým šumům vznikajícím interakcí mezi testovacím tónem a maskujícím úzkopásmovým šumem. Tedy vjem, který posluchač označí jako překročení prahu maskování, souvisí právě s rozdílovým šumem. Skutečný práh maskování je dán tečkovanou křivkou v obrázku 4.7.

Výše uvedené příklady se týkaly situace, kdy jak maskovaný, tak maskující zvuk se vyskytují současně. Efekt maskování se může projevat i v případech po sobě jdoucích zvuků. Nejčastěji předchází maskující zvuk maskovanému. Basiální membrána potřebuje na své zotavení po vybuzení maskujícím zvukem jistý čas, než je schopna reagovat na vybuzení novým signálem. Hovoříme pak o postmaskovacím efektu.

Na obr. 4.8 je znázorněn postmaskovací efekt, kdy maskující zvuk je bílý šum o délce 0,5 s a maskovaný zvuk je krátký impuls podobný Diracovu impulsu. Z obrázku je patrné, že do 5 ms se úroveň nemění a potom klesá až do 200 ms, kdy zcela zaniká (dosáhne prahu slyšitelnosti). Tento časový efekt nezávisí na hladině maskujícího šumu. Čárkované křivky odpovídají exponenciálnímu poklesu postmaskovacího efektu a jejich srovnáním s naměřenými křivkami je zřejmé, že se o exponenciální pokles nejedná.

Ostrost

Dříve byla snaha zahrnovat všechny psychoakustické znaky časově ustálených zvuků, které nebylo možno zahrnout pod hlasitost nebo výšku, pod společný znak barvu. Ukázalo se, že barvu zvuku však lze rozdělit do skupiny víceméně samostatných znaků⁶, ze kterých je zřejmě nejvýraznější *ostrost* (sharpness). Velmi blízko ostrosti je také znak příjemnost, který je téměř opakem ostrosti.

Výzkumy ukázaly, že na sluchový znak ostrost má podstatný vliv tvar obálky spektra. Naopak jemná struktura spektra na ostrost v podstatě vliv nemá. Tedy hluk, který má spojité spektrum, působí stejným dojmem ostrosti, jako zvuk složený z mnoha diskrétních složek, pokud spektrální obálka měřená po kritických pásmech je shodná. Nejvýznamnější pro ostrost je amplituda střední frekvence úzkopásmového šumu, resp. úzkopásmových šumů. Jednotkou ostrosti byl proto zvolen 1 acum (latinsky ostrý), který je definován jako ostrost úzkopásmového šumu o kritické šířce pásma se střední frekvencí 1 kHz a hladinou 60 dB.

Pro nízké střední frekvence roste ostrost úměrně kritickopásmové stupnici (až přibližně do 3 kHz), pro vyšší frekvence pak roste dojem ostrosti rychleji. Proto jsou vyšší frekvence více odpovědné za ostrost zvuku. Šířka pásma také ovlivňuje pocit ostrosti. Rozšíříme-li pásmový šum odpovídající kritickému pásmu 1 kHz na pásmo do 10 kHz, vzroste pocit

Kolísavost a hrubost

V psychoakustickém hodnocení zvuků hraje také důležitou roli časová stabilita amplitudy zvuku. Ta se může periodicky měnit, tedy být amplitudově modulována. Při pomalých změnách do cca 20 Hz je výsledný zvuk hodnocen jako kolísavý a pro rychlejší změny je zvuk hodnocen jako hrubý nebo drsný.

Pro pomalé změny se proto zavádí veličina *kolísavost* (fluctuation strength), která má jako referenční hodnotu a jednotku 1 vacil kolísání tónu 1 kHz se střední hladinou akustického tlaku 60 dB, modulační frekvencí 4 Hz a hloubkou modulace 1 dB. Kolísavost závisí především na modulační frekvenci a na vnímané hloubce modulace, která je proti fyzické hloubce modulace omezená díky postmaskovacímu jevu.

Při poslechu 100% amplitudově modulovaného tónu 1 kHz od prakticky nulové modulační frekvence do modulace cca 300 Hz budeme nejprve zvuk hodnotit jako kolísavý. Dojem kolísavosti bude nejsilnější okolo 4 Hz. Při modulační frekvenci okolo 15 Hz se začne objevovat dojem hrubosti, který dosahuje svého maxima okolo 70 Hz. Kolem 300 Hz tento jev zaniká. Studie ukázaly, že změny amplitudy (modulace) nemusejí být periodické, proto jistý stupeň hrubosti vykazují např. i úzkopásmové šumy. Pro změny amplitudy v rozmezí od 15 Hz do 300 Hz se zavádí psychoakustická veličina *hrubost* (roughness), která je přímo úměrná vnímané hloubce modulace a modulační frekvenci. Vnímaná hloubka modulace klesá díky postmaskovacím jevům s rostoucí modulační frekvencí, proto je hrubost vnímána jako maximální právě okolo 70 Hz.