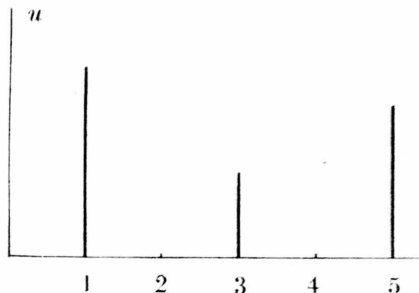


ného zvuku a matematickej poučky, podľa ktorej každú periodickú funkciu možno napísať v tvare Fourierovho radu (pozri čl. 2.21).

Pod pojmom zafarbenie tónu rozumieme tú jeho vlastnosť, podľa ktorej rozoznáme aj dva tóny rovnakej výšky a intenzity, avšak zahrané napr. na rozličných hudobných nástrojoch. Príčinou tejto rozličnosti je nerovnaký časový priebeh kmitania v perióde, čiže v zmysle toho, čo sme práve povedali o zložených tónoch, nerovnaké zastúpenie vyšších harmonických tónov v zloženom tóne, pričom podľa skúsenosti rozhoduje len ich frekvencia a amplitúda, nie však aj ich fázová konštanta. Táto okolnosť umožňuje vyjadriť zložený hudobný tón jeho tzv. *frekvenčným spektrom*, v ktorom dĺžky *akustických spektrálnych čiar* vyjadrujú amplitúdy harmonických zložiek zloženého tónu. Obr. 9.1 predstavuje frekvenčné spektrum huslí.



Obr. 9.1

Hudobné zvuky, v ktorých je mnoho vyšších harmonických tónov, avšak s intenzitami, ktoré sa znižujú s ich poradovým číslom, vnímame ako *plné*. Takéto zvuky možno vytvoriť napríklad zahráním nerozložených akordov na hudobných nástrojoch. Keď z vysokých harmonických tónov sú silné len niektoré, zvuk nadobúda na prenikavosti a *lesku*, ako napríklad zvuk huslí. Zvuk, v ktorom sú zastúpené len harmonické tóny s menšími frekvenciami, javí sa ako *dutý*.

Subjektívny dojem výšky tónu okrem od jeho frekvencie závisí aj od jeho intenzity a zafarbenia. Pre túto príčinu v hudobnej akustike sa výška tónu určuje jeho subjektívnym porovnaním s jednoduchým tónom, ktorého hladina intenzity je 40 dB (pozri č. 9.2). Jednotka takto určenej výšky tónu sa nazýva *mel*.

9.2. Hladina intenzity a hlasitosti zvuku. Zvuky vnímame ako silné alebo slabé. Za objektívnu fyzikálnu mieru sily zvuku bola zvolená stredná hodnota intenzity príslušného zvukového vlnenia, ktorá — ako už vieme — má význam energie vlnivého pohybu, prechádzajúcej za jednotku času cez plošnú jednotku na smer postupu vlnenia kolmú.

Subjektívna sila zvuku alebo *hladina* jeho *hlasitosti* v dôsledku toho, že sluch je nerovnako citlivý pre tóny rôznych výšok, môže však byť aj pri dvoch zvukoch rovnakej intenzity rôzna. Okrem toho subjektívny vnem sily zvuku nerastie úmerne s jeho fyzikálnou intenzitou, ale zhruba podľa *Weberovho a Fechnerovho fyziologického zákona*: keď fyzikálna intenzita tónu i danej frekvencie rastie geometrickým radom (zväčšuje sa teda vždy v tomže

pomere), jeho subjektívny účinok h na ľudské ucho (hladina hlasitosti tónu) sa zväčšuje približne len aritmetickým radom (s rovnakým prírastkom). Približne správne matematické vyjadrenie závislosti intenzity tónu od hladiny jeho hlasitosti má teda tvar

$$i = ka^h \quad (1)$$

Konštanty k a a v tomto vzorci môžu byť určené voľbou intenzity tónu, ktorého hladina hlasitosti sa má napríklad rovnať nule, a voľbou jej jednotky.

Keďže ucho nemôže vnímať zvuk ľubovoľne malej intenzity, je prirodzené označiť nulou hladinu hlasitosti zvuku určitého zloženia, ktorý priemerné ľudské ucho práve už nevníma. Jeho intenzita sa nazýva *prahová intenzita* a označuje sa i_0 . Dosadením týchto zodpovedajúcich si hodnôt do rovnice (1) dostaneme $k = i_0$, takže rovnica (1) je potom

$$i = i_0 a^h \quad (2)$$

Jednotka hladiny hlasitosti bola určená ako desatina rozdielu hladín hlasitosti dvoch zvukov, z ktorých hlasitejší má fyzikálnu intenzitu 10-krát väčšiu ako druhý; nazýva sa *fón* (značka Ph). Z tejto definície jednotky hladiny hlasitosti vyplýva, že ak fyzikálne intenzity dvoch zvukov spĺňajú vzťah $i_2 = 10i_1$, ich hladiny hlasitosti sa odlišujú o 10 Ph. Z rovníc $i_1 = i_0 a^h$ a $10 i_1 = i_0 a^{h+10}$ delením vyplýva

$$10 = a^{h+10} : a^h = a^{10}$$

takže $a = \sqrt[10]{10}$.

Podľa tohto výsledku vzťah medzi hladinou hlasitosti a intenzitou vyjadruje vzorec, ktorý vyplýva už z rovnice (2)

$$i = i_0 10^{\frac{h}{10}}$$

alebo

$$h = 10 \log \frac{i}{i_0} \quad (3)$$

Vzorec (3) napriek svojej jednoduchosti sa však pre bežné používanie v akustickej praxi nehodí, lebo predpokladá znalosť prahovej intenzity pre zvuky rôznych výšok a charakteru. Pre túto príčinu sa pomocou vzorca (3) určuje hladina hlasitosti len tzv. referenčného tónu, jednoduchého harmonického tónu s frekvenciou 1 000 Hz, ktorého zvukový prah je $i_0^* = 10^{-16}$ watt/cm². Hladina hlasitosti referenčného tónu je teda určená vzorcom

$$h = 10 \log \frac{i}{i_0^*} \quad (4)$$

Hladina hlasitosti iných zvukov bola definovaná takto: Hladina hlasitosti zvuku sa rovná hlasitosti pre ľudské ucho rovnako silného jednoduchého tónu s frekvenciou 1 000 Hz.

Veličina definovaná pre akýkoľvek zvuk vzorcom

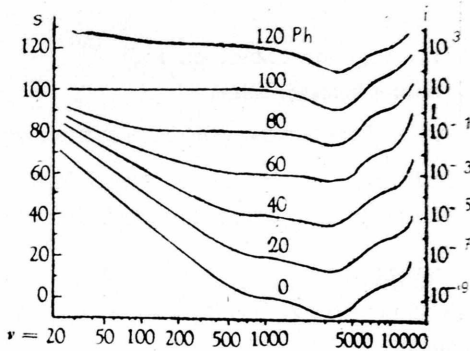
$$s = \log \frac{i}{i_0^*} \quad (5)$$

v ktorom i_0^* je zvukový prah referenčného tónu, volá sa *hladina intenzity* tohto zvuku. Jednotka takto definovanej hladiny intenzity zvuku sa volá bel (značka B), podľa mena amerického fyzika A. G. Bella (1847—1922), vynálezcu telefónu. Desatina tejto jednotky sa volá decibel (značka dB). Z porovnania vzorcov (4) a (5) vyplýva, že pre referenčný tón $h = 10s$. Keď teda hladina intenzity referenčného tónu je napríklad 5 bel = 50 decibel, jeho hladina hlasitosti $h = 10s = 50$ fón.

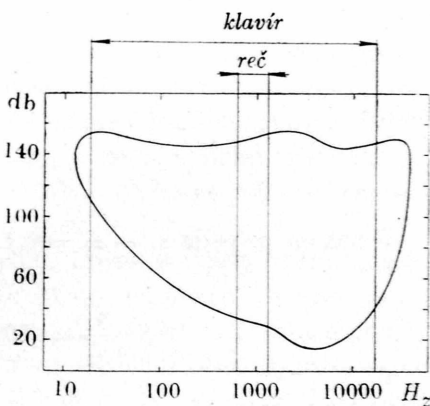
Merné čísla hladiny intenzity v decibelloch a hladiny hlasitosti vo fónoch referenčného, no vo všeobecnosti len referenčného tónu, sú teda rovnako veľké.

Ako závisí citlivosť ucha od výšky tónu, je zrejmé z priebehu *Kingsburyho kriviek rovnakej hladiny hlasitosti* (obr. 9.2). Krivky označené hodnotami hladín hlasitosti vo fónoch od 0 do 120 fón udávajú pre každú frekvenciu hladinu intenzity s potrebnú na dosiahnutie danej hladiny hlasitosti. Z diagramu vyplýva, že ľudské ucho je pri všetkých intenzitách najcitlivejšie pre tóny s frekvenciou 3 000 až 4 000 Hz.

Uzavretá čiara na obr. 9.3 ukazuje, že oblasť, v ktorej ľudské ucho je schopné vnímať tóny, je zo všetkých strán ohraničená. Keď intenzita zvuku prekročí určitú hranicu, máme v uchu už len pocit bolesti a nevnímame nijaký zvuk. Z diagramu na tomto obrázku vyplýva aj to, že frekvencia vlnenia, ktoré ľudské ucho môže vní-



Obr. 9.2



Obr. 9,3

Tabuľka 9.1

Zvuky rôznej hladiny hlasitosti

Zvuk	Hladina hlasitosti [Ph]
Zvukový prah	0
Šelest listia	10
Šum listia	20
Pouličný hluk v tichom predmestí	30
Tlmený rozhovor	40
Normálny pouličný hluk	50
Hlasitý rozhovor	60
Hluk na silne frekventovaných uliciach veľkomesta	70
Hluk v tuneloch podzemných železníc	80
Veľmi hlasná trúba	90
Maximálny hluk motorky	100
Nitovacie kladivá	110
Lietadlo vo vzdialenosti 4 m	120
Hluk pôsobiaci bolesť	130

mať ako zvuk, je v hraniciach 16 až asi 20 000 kmitov za sekundu. Príklady zvukov rôznej hladiny hlasitosti podáva *tabuľka 9.1*.

Príklad 1. Vypočítame podiel intenzít dvoch tónov, ktorých hladiny intenzity sa líšia o 1 dB. Podľa vzorca (5), ak intenzity týchto dvoch tónov sú i_1 a i_2 , hladiny ich intenzít sú:

$$s_1 = \log \frac{i_1}{i_0^*}$$

$$s_2 = \log \frac{i_2}{i_0^*}$$

takže

$$s_1 - s_2 = \log \frac{i_1}{i_2}$$

V našom prípade $s_1 - s_2 = 0,1$. Preto

$$\frac{i_1}{i_2} = 10^{0,1} = \sqrt[10]{10} = 1,259$$

Úloha 1. Treba vypočítať efektívny pretlak zvukového prahu referenčného tónu šíriaceho sa vzduchom za normálnych podmienok.

Riešenie: Intenzita zvukového prahu referenčného tónu je $i_0^* = 10^{-16}$ watt/cm².

Zo vzorca $i = \frac{P_e^2}{sc}$, vyplýva, že druhá mocnina hľadaného efektívneho pretlaku

$$P_e^2 = isc = 10^{-16} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \cdot 0,001293 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 331,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 10^{-9} \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2} \cdot 0,001293 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 33140 \frac{\text{cm}}{\text{s}},$$

$$P_e = 2 \cdot 10^{-4} \text{ dyn/cm}^2$$

Podľa vzorcov (1) amplitúda príslušnej akustickej výchylky je len

$$u_0 = \frac{P_e}{\pi scv \sqrt{2}} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 1,3 \cdot 331 \cdot 1000 \cdot 1,4} \text{ m} \doteq 10^{-9} \text{ cm}$$

a amplitúda akustickej rýchlosti

$$v_0 = \omega u_0 = 2\pi\nu u_0 = 6,28 \cdot 1000 \cdot 10^{-8} \text{ cms}^{-1} \doteq * \cdot 10^{-5} \text{ cms}^{-1}$$

Úloha 2. O koľko decibelov sa zvýši hladina intenzity zvuku, keď sa jeho fyzikálna intenzita zvýši 5-krát?

Hladina intenzity zvuku je daná vzorcom $s = \log \frac{i}{i_0^*}$, kde i_0^* je intenzita zvukového prahu referenčného tónu. Ak je $i_2 = 5i_1$, je

$$s_2 - s_1 = \log \frac{i_2}{i_0^*} - \log \frac{i_1}{i_0^*} = \log \frac{i_2}{i_1} = \log 5 = 0,7 = 0,7 \text{ bel} = 7 \text{ dB}$$

Úloha 3. Koľkokrát sa musí zmenšiť fyzikálna intenzita referenčného tónu, ktorého hladina hlasitosti je 30 Ph, aby sa stal nepočuvateľným?

Hladina hlasitosti referenčného tónu je daná vzorcom $h = 10 \log \frac{i}{i_0^*}$ podľa ktorého

$$\frac{i}{i_0^*} = 10^{h/10} = 10^3 = 1000$$

9.3. Detektory a prístroje na meranie intenzity zvuku. Z výsledkov úlohy riešenej na konci predchádzajúceho článku vyplýva, že ľudské ucho je neobvyčajne citlivým detektorom zvuku. Je súčasne aj jeho analyzátorom, lebo citlivo rozlišuje zvuky podľa ich frekvencií. Fyzikálne detektory zvuku možno rozdeliť do štyroch skupín podľa toho, či reagujú na akustickú výchylku u , akustickú rýchlosť v , striedavý akustický pretlak P alebo na jeho priemernú hodnotu P^* .

Zariadenia založené na akustickej výchylke, ktorá je vždy veľmi malá, nemajú praktický význam. K nim patrí mikroskop, pomocou ktorého pozorujeme častice napr. cigaretového dymu, ktoré pôsobením vnútorného trenia sledujú pohyb elementov vodiča zvuku. Keď vo vzduchu obsahujúcom cigaretový dym nie je zvukové vlnenie, pri vhodne bočnom osvetlení častice dymu sa objavujú v zornom poli mikroskopu ako nepokojné svietiace body (Brow-