

CAP. IV. ELEMENTE DE ACUSTICĂ. ULTRASUNETE

Sunetele sunt unde elastice care produc senzație auditivă în urechea umană și care au frecvența cuprinsă între 16 Hz și 20 kHz. Undele elastice cu frecvența sub 16 Hz se numesc *infrasunete*, cele cu frecvența cuprinsă între 20 kHz și 10^6 kHz se numesc *ultrasunete*, iar cele care au frecvența între 10^6 kHz și 10^{11} kHz se numesc *hipersunete*.

Clasificarea sunetelor

- sunet pur* - are frecvența bine definită (ν);
- sunet muzical* - prezintă un *spectru discret* de frecvențe, adică este format dintr-un sunet fundamental (ν_{\min}) însoțit de armonice având diferite frecvențe ($2\nu_{\min}$, $3\nu_{\min}$, ...); este descris de o *serie Fourier*;
- zgomot* - este un proces neperiodic, deci prezintă un *spectru continuu* de frecvențe; este descris de o *integrală Fourier*;
- pocnet* - este un proces cu durată sub 0,06 s;
- explozie (detonație)* - proces care produce variații locale foarte mari ale presiunii și, în consecință, intensități foarte mari.

Regiunea din spațiu în care se propagă sunetele se numește *câmp sonor*.

IV.1. Mărimi fizice caracteristice sunetului

1) *presiunea sonoră* (p_s) variază în timp și spațiu, formând *unda de presiune*, dată de relația (III.31)

$$p_s(x, t) = p_u(x, t) = EkA \sin(\omega t - kx), \quad (\text{IV.1})$$

unde $p_{s, \max} = p_{u, \max} = EkA = \rho v^2 A \omega / v = \rho v A \omega = Z u_{\max}$ (IV.2)

este presiunea sonoră maximă, $Z = \rho v$ este impedanța acustică, iar $u_{\max} = \omega A$ este viteza maximă de oscilație a particulelor mediului. Se definește *presiunea sonoră efectivă* prin:

$$p_{s, ef} = \frac{p_{s, \max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{IV.3})$$

2) *intensitatea sonoră* (I_s) depinde atât de caracteristicile sursei (A , ω), cât și de cele ale mediului ($Z = \rho v$), conform relațiilor (III.53), (III.55) și (III.56):

$$I_s = I = \langle w \rangle v = \frac{\rho \omega^2 A^2 v}{2} = \frac{Z u_{\max}^2}{2} \quad (\text{IV.4})$$

sau

$$I_s = \frac{P_{s,\max}^2}{2Z} = \frac{P_{s,ef}^2}{Z} \quad (\text{IV.4'})$$

Relația (IV.4') se numește *legea lui Ohm în acustică* (prin analogie cu cea referitoare la circuitele de curent alternativ: $I_s \rightarrow P_{activa}$; $P_{s,ef} \rightarrow U_{ef}$).

3) *nivelul de intensitate sonoră* (N_s) se definește prin:

$$N_s = \lg \frac{I_s}{I_{0s,\min}} \quad (\text{IV.5})$$

unde $I_{0s,\min}$ este intensitatea sonoră minimă care mai poate fi percepută de urechea umană pentru sunetul de referință, cu frecvența $\nu_0 = 1$ kHz numit și *sunet normal*; valoarea ei este: $I_{0s,\min} = 10^{-12}$ W/m². Unitatea de măsură pentru N_s se numește bel (B). Un bel reprezintă nivelul sonor al unui sunet cu $I_s = 10I_{0s,\min}$. În practică se folosește decibelul (dB), 1dB = 0,1B. Relația (IV.5) devine:

$$N_s (dB) = 10 \lg \frac{I_s}{I_{0s,\min}} \quad (\text{IV.6})$$

Deoarece $I_s \sim p_{s,ef}^2$ relația (IV.6) se mai scrie sub forma:

$$N_s (dB) = 20 \lg \frac{p_{s,ef}}{p_{0s,ef,\min}} \quad (\text{IV.6'})$$

unde $p_{0s,ef,\min} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

IV.2. Condițiile de audibilitate

Pentru a produce senzație auditivă în urechea umană unda sonoră trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- durata excitației sonore trebuie să depășească 0,06 s (în caz contrar se obține senzația de pocnet);
- frecvența să fie cuprinsă între 16 Hz și 20 kHz;

c) intensitatea sonoră să fie cuprinsă între o valoare minimă $I_{s,\min}$ și una maximă $I_{s,\max}$, ambele dependente de frecvență. Dacă $I_s > I_{s,\max}$ apare senzația de durere. Pentru sunetul normal ($\nu_0 = 1$ kHz) valorile extreme ale intensității sonore sunt: $I_{0s,\min} = 10^{-12}$ W/m² și $I_{0s,\max} = 10^2$ W/m². În Fig.IV.1 sunt prezentate curbele corespunzătoare pragului de audibilitate și pragului de durere în funcție de frecvență. Condiția c) se poate exprima în funcție de nivelul de intensitate sonoră: $N_s \in [0; 140 \text{ dB}]$.

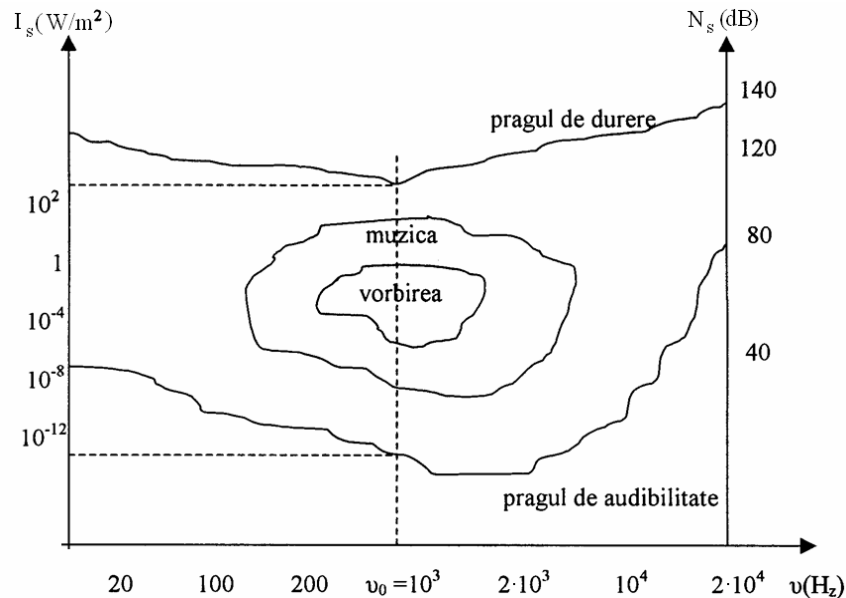


Fig. IV.1. Pragul de audibilitate și pragul de durere în funcție de frecvența sunetului.

IV.3. Caracteristici fizico-fiziologice ale sunetului

1) *Legea Weber - Fechner* exprimă legătura dintre intensitatea senzației auditive S și intensitatea I a excitației sonore. Experimental, se constată că variația senzației ΔS este direct proporțională cu variația relativă $\frac{\Delta I}{I}$ a intensității excitației, dacă ΔI și ΔS sunt mici. Relația $\Delta S \sim \frac{\Delta I}{I}$ se scrie sub forma diferențială: $dS = C_1 \frac{dI}{I}$ (C_1 este o constantă) și se integrează:

$$S_2 - S_1 = C_1 \ln \frac{I_2}{I_1} = 2,3C_1 \lg \frac{I_2}{I_1} = C \lg \frac{I_2}{I_1} \quad (\text{IV.7})$$

Așadar, *variația senzației este direct proporțională cu logaritmul raportului dintre intensitățile corespunzătoare ale excitației.*

Cu alte cuvinte, *dacă intensitatea excitației crește în progresie geometrică, intensitatea senzației crește în progresie aritmetică.*

2) *intensitatea auditivă* (I_a) este intensitatea sonoră a sunetului normal ($\nu_0 = 1$ kHz) care produce aceeași senzație auditivă ca și sunetul considerat.

3) *nivelul de intensitate auditivă* (N_a) sau *tăria sunetului*

Intensitatea senzației auditive S depinde de frecvența sunetului (ν) și de intensitatea sonoră (I_s). Conform legii Weber - Fechner:

$$S(I_s, \nu) - S(I_{s,\text{inf}}, \nu) = C(\nu) \lg \left[\frac{I_s(\nu)}{I_{s,\text{inf}}(\nu)} \right] \quad (\text{IV.8})$$

Alegând $S(I_{s,\text{inf}}, \nu) = 0$ obținem: $S(I_s, \nu) = C(\nu) \lg \left[\frac{I_s(\nu)}{I_{s,\text{inf}}(\nu)} \right]$ (IV.8')

unde $I_{s,\text{inf}}(\nu)$ descrie pragul auditiv inferior în funcție de frecvență. Pentru sunetul normal ($\nu_0 = 1$ kHz), $C(\nu_0) = 10$ și relația (IV.8') devine:

$$S(I_s, \nu_0) = 10 \lg \left[\frac{I_s(\nu_0)}{I_{0s,\text{min}}} \right] \quad (\text{IV.9})$$

unde, prin definiție: $I_s(\nu_0) = I_a$ este intensitatea auditivă, iar $S(I_s, \nu_0) = N_a$ este nivelul de intensitate auditivă. Deci:

$$N_a = 10 \lg \frac{I_a}{I_{0s,\text{min}}} \quad (\text{IV.9'})$$

Unitatea de măsură pentru N_a se numește *fon*.

În concluzie: *Tăria sunetului N_a exprimată în foni este egală cu nivelul sonor exprimat în decibeli al sunetului normal ($\nu_0 = 1$ kHz) care produce aceeași senzație auditivă ca și sunetul considerat.*

Exemple pentru N_a : tic-tac-ul unui ceas deșteptător, la distanța de 1 m: 20 foni; vorbire tare, la 5 m: 70 foni; stradă zgomotoasă: 90 foni; orchestră mare: 100 foni; motor de avion, la 5 m: 130 foni.

4) *înălțimea sunetului* este însușirea sunetului de a fi mai grav (jos) sau mai acut (ascuțit). Ea depinde de frecvența fundamentală, de armonicile care o însoțesc și de intensitatea sonoră. Cu cât frecvența fundamentală este mai mare, cu atât sunetul este mai acut (dar relația dintre ele nu este una simplă).

5) *timbrul sunetului* este determinat de spectrul undei, adică de numărul și de amplitudinea armonicilor care însoțesc frecvența fundamentală. Astfel se pot deosebi sunetele cu aceeași tărie și cu aceeași înălțime emise de instrumente muzicale diferite.

IV. 4. Ultrasunete

1) Generarea și detecția ultrasunetelor

se face prin metode: mecanice, termice, electromecanice (efect piezoelectric) și magnetomecanice (efect magnetostrictiv). Se folosesc mai des ultimele două.

a) *Efectul piezoelectric* se produce în anumite cristale: cuarț, turmalină, sarea Seignette etc. *Efectul piezoelectric direct* constă în apariția unei diferențe de potențial (tensiune electrică) între două fețe ale plăcuței cristaline atunci când i se aplică o deformare mecanică pe direcția respectivă sau pe una perpendiculară. Acest efect este folosit în detecția ultrasunetelor.

Efectul piezoelectric invers constă în apariția unei deformări mecanice când între două fețe ale plăcuței cristaline se aplică un câmp electric. Acest efect este folosit în generarea ultrasunetelor.

Considerăm ca exemplu un monocristal de cuarț care este format dintr-o prismă hexagonală și două piramide hexagonale lipite de bazele prisme (Fig.IV.2a). Axa de simetrie a cristalului, notată ZZ' este axa optică. Secțiunea transversală pe această axă este un hexagon. Axa XX' care unește două vârfuri diametral opuse ale hexagonului este axa electrică, iar axa YY' care este perpendiculară pe două laturi opuse ale hexagonului este axa mecanică. Axele XX' și YY' sunt perpendiculare. Plăcuța de cuarț folosită pentru producerea efectului piezoelectric este paralelipipedică și se taie astfel încât două fețe opuse ale ei să fie paralele cu axa electrică (bineînțeles ca celelalte două perechi de fețe sunt paralele cu axa mecanică, respectiv cu axa optică), conform Fig.IV.2b. Pe fețele care sunt perpendiculare pe axa electrică se depun, prin pulverizare în vid, două straturi metalice subțiri, care constituie electrozii plăcuței.

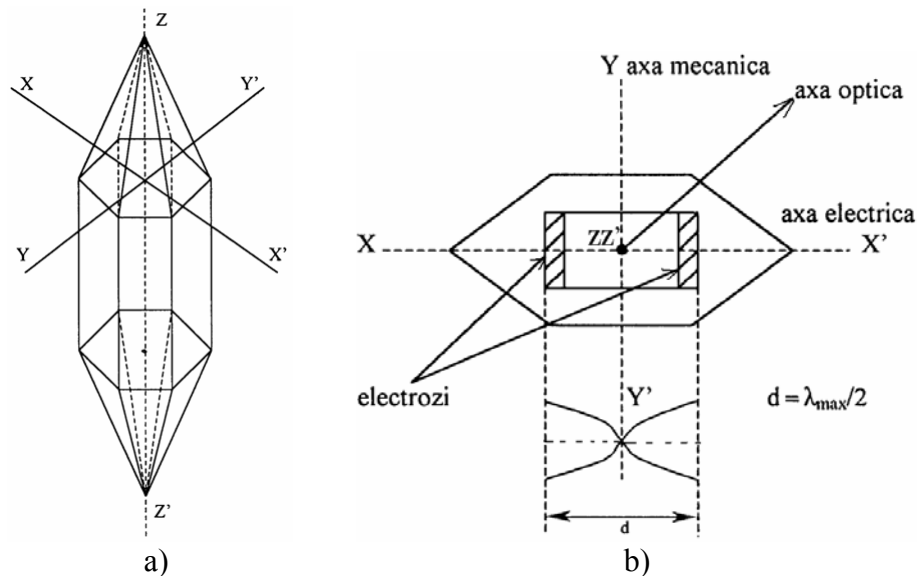


Fig. IV. 2. a) Axele principale ale unui monocristal de cuarț; b) Efectul piezoelectric longitudinal.

Efectul piezoelectric (atât cel direct cât și cel invers) este de două feluri: *longitudinal* (deformația mecanică și tensiunea electrică sunt, ambele, pe axa XX') și *transversal* (deformația mecanică este pe axa YY' , iar tensiunea electrică pe axa XX'). În practică se folosește mai ales efectul longitudinal.

Generatorul piezoelectric folosește o plăcuță de cuarț ca cea descrisă mai sus. Pe axa XX' se aplică o tensiune electrică alternativă (și anume sinusoidală). Plăcuța suferă comprimări și întinderi periodice având frecvența egală cu cea a tensiunii sinusoidale, iar în mediul în care ea se află se produc unde elastice. Pentru producerea de ultrasunete frecvența trebuie să fie mai mare de 20 kHz. Deoarece plăcuța este un mediu limitat se produc unde staționare având ventre (maxime) la capetele plăcuței. Notăm cu d grosimea plăcuței pe direcția axei electrice XX' . Condiția pentru unde staționare este:

$$d = p \frac{\lambda_p}{2} \text{ cu } p = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{IV.10})$$

Dar frecvența este: $\nu_p = \frac{v}{\lambda}$, iar viteza de propagare este: $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Obținem astfel frecvențele proprii de vibrație ale plăcuței:

$$\nu_p = \frac{p}{2d} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{IV.11})$$

Pentru modul fundamental de oscilație relațiile (IV.10) și (IV.11) devin: $d = \frac{\lambda_{\max}}{2}$ și

$\nu_{\min} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Pentru ca amplitudinea undelor staționare să fie maximă și, în consecință,

intensitatea ultrasunetelor să fie mare trebuie ca plăcuța de cuarț să oscileze *în rezonanță* cu tensiunea sinusoidală, adică frecvența acestei tensiuni să fie egală cu una din frecvențele proprii de vibrație (IV.11) ale plăcuței.

b) *Efectul magnetostrictiv* se produce în substanțe feromagnetice: fier, cobalt, aliaje feromagnetice. *Efectul magnetostrictiv direct* constă în deformarea unei bare feromagnetice supusă acțiunii unui câmp magnetic longitudinal. Acest efect este folosit în generarea ultrasunetelor.

Generatorul magnetostrictiv folosește o bobină al cărei miez este o bară feromagnetică (Fig.IV.3). Bobina este alimentată de o sursă de tensiune alternativă sinusoidală având frecvența mai mare de 20 kHz. Frecvențele proprii de vibrație ale barei feromagnetice sunt asemănătoare cu cele ale plăcuței de cuarț de la generatorul piezoelectric:

$$\nu_p = \frac{p}{2\ell} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ cu } p = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{IV.12})$$

unde ℓ este lungimea barei feromagnetice.

Pentru modul fundamental: $l = \frac{\lambda_{\max}}{2}$ și $v_{\min} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Acest generator trebuie să funcționeze și el la rezonanță, deci frecvența tensiunii sinusoidale trebuie să fie egală cu una din frecvențele proprii (IV.12) ale barei feromagnetice.

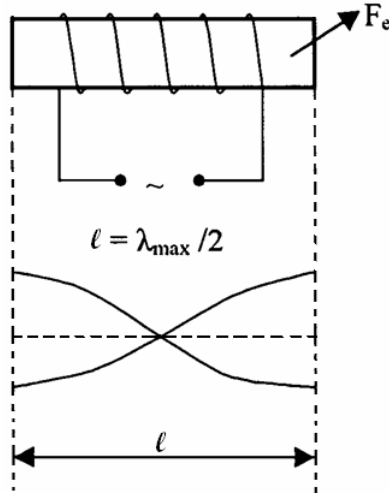


Fig. IV. 3. Efectul magnetostrictiv.

Efectul magnetostrictiv invers constă în apariția unui câmp magnetic de-a lungul unei bare feromagnetice când ea este deformată pe această direcție. Acest efect este folosit în detecția ultrasunetelor.

2) Proprietățile ultrasunetelor

- au frecvența cuprinsă între 20 kHz și 10^6 kHz
- au lungime de undă foarte mică, deci efectele de difracție sunt neglijabile, ceea ce permite dirijarea și focalizarea ultrasunetelor în fascicule înguste și intense
- datorită frecvenței mari și a faptului că densitatea volumică medie de energie este direct proporțională cu pătratul frecvenței ($\langle w \rangle \sim \nu^2$) energia lor se poate concentra la valori foarte mari în domenii limitate
- imprimă particulelor mediului accelerații foarte mari, de ordinul $10^5 g$ (g este accelerația gravitațională)
- sunt absorbite foarte mult în gaze și mai puțin în lichide și solide
- prezintă dispersie puternică.

3) Aplicațiile ultrasunetelor se împart în două categorii:

- *aplicații active* - în care energia ultrasunetelor este suficient de mare pentru a produce modificări în structura materialului prin care se propagă
- *aplicații pasive* - în care energia ultrasunetelor este mică astfel încât ele nu produc modificări de structură, dar, în urma trecerii prin material, poartă informații referitoare la proprietățile acestuia.

O mare parte din aplicațiile active se bazează pe **fenomenul de cavitație** care constă în ruperea unui lichid în anumite zone și refacerea lui imediată sub acțiunea unor tensiuni mecanice foarte mari sau a unor variații rapide și puternice ale presiunii. Datorită variațiilor mari de presiune distanța medie dintre particulele mediului variază și, când se depășește o anumită valoare, lichidul se rupe, apărând goluri (cavități) microscopice. Ruperea are loc în zonele rarefiate (adică de slabă rezistență) ale lichidului numite germeni de cavitate. În primă fază bula de cavitație își mărește volumul prin umplere cu gazul sau aerul care se afla la locul respectiv sau cu vaporii lichidului. După ce atinge o anumită mărime bula suferă o compresie bruscă (se distruge). Comprimarea fiind adiabatică, temperatura și presiunea cresc foarte mult (se obțin temperaturi de ordinul 10^4 K și presiuni de ordinul 10^6 atm.). Ca efect negativ al cavitației menționăm distrugerea elicelor la vapoare.

Efecte pozitive sunt **aplicațiile active**: prelucrarea materialelor dure, prelucrarea materialelor casante, curățirea pieselor metalice, ceramice sau din sticlă, tratarea topiturilor metalice având ca scop degazarea lor, reducerea granulelor metalice, dispersarea unui metal în altul (omogenizarea aliajelor). În biologie ultrasunetele se folosesc pentru distrugerea bacteriilor.

Ca **aplicații pasive** amintim: *defectoscopia ultrasonoră nedistructivă* (reflexia și refracția ultrasunetelor pe defectele interioare ale materialului dau informații despre forma și mărimea acestora) și *hidrolocația ultrasonoră* (*sonar* = dispozitiv care localizează obiectele din apă sau profilul fundului mării folosind reflexia ultrasunetelor).

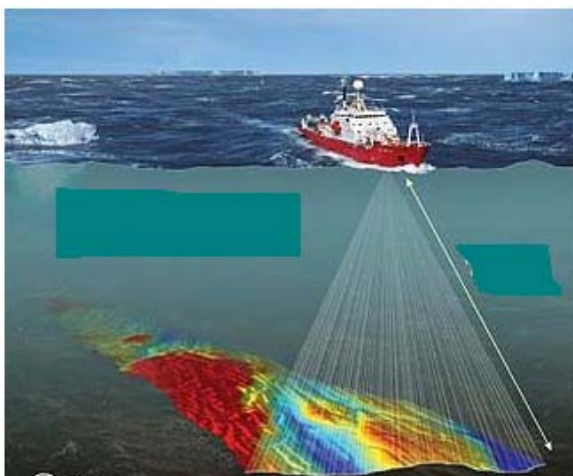


Fig. IV. 4. Hidrolocația ultrasonoră (sonar: creat de om, inspirat de natură).